
Projet de session

POLYTECHNIQUE
MONTREAL

UNIVERSITÉ
D'INGÉNIERIE



Analyse de Performances des Applications sur Réseaux 5G : Une Étude via Simulation

ELE8702 - Réseaux de communication sans-fil

Hiver 2024

Département de génie électrique
École Polytechnique de Montréal

Dernière mise à jour: 18 avril 2024

Bouh Abdillahi	1940646
Mohamed Anis Mekkaoui	2051493
Vincent Yves Nodjom	1944011
Abdenour Taoufella	2055374

Travail présenté à
Mme Brunilde **Sanso**

Table des matières

1	Introduction	4
2	Présentation général des application à considérer	4
2.1	Streaming 4K	4
2.2	Contrôle manuel de drone	5
2.3	Détection d'automobile	5
3	Modélisation du simulateur	5
3.1	Description du simulateur	5
3.2	Changements et Ajouts	5
3.3	Description des modules	6
3.3.1	Allocation de Ressource Blocks (RB) aux UEs	7
3.3.2	Traitement et Transmission de paquets	7
3.3.3	Planificateur (Scheduler) et Tampon (Buffer)	8
3.3.4	Association de CQI pour chaque UE	8
4	Méthodologie et Tests	9
4.1	Sélection des paramètres de test	9
4.1.1	Largeur de bande	9
4.1.2	Longueur de paquets	10
4.1.3	Conditions de réseau (pathloss/CQI)	10
5	Résultats de Tests	11
5.1	Bande de Fréquence FR1	11
5.1.1	Les trois applications fonctionnant séparément	11
5.1.2	Les trois applications combinées	12
5.2	Bande de Fréquence FR2	12
5.2.1	Les trois applications fonctionnant séparément	12
5.2.2	Les Applications combinées	13
6	Discussion de Résultats	13
6.1	Bande de Fréquence FR1	13
6.1.1	Les trois applications fonctionnant séparément	13
6.1.2	Les trois applications combinées	14
6.2	Bande de Fréquence FR2	14
6.2.1	Les trois applications fonctionnant séparément	15
6.2.2	Les trois applications combinées	15
7	Lien entre les résultats et l'implémentation du simulateur	16
7.1	Proposition d'amélioration du simulateur	16
8	Conclusion	17

9 Lien de code source pour la programmation et reproduction des données

17

Table des figures

1	Trafic moyenne des par UE	11
2	Nombre de RB allouées par UE	11
3	Nombre de RB alloués UE (à gauche) et le trafic moyen des antennes (à droite) . . .	12
4	Trafic moyenne des par UE	12
5	Nombre de RB allouées par UE	13
6	Nombre de RB alloués UE (à gauche) et le trafic moyen des antennes (à droite) . . .	13

Liste des tableaux

Acronymes

5G	5th Generation Mobile Networks
NR	New Radio
UE	User Equipment
FR	Frequency Range

Notations

N_{RE}^{RB}	Nombre de Resource Elements par Resource Block
CQI	Channel Quality Indicator
RE	Resource Element
RB	Resource Block
ID	Identifier
N_{info}	Taille du message à transmettre

1 Introduction

Dans le contexte actuel de l'évolution rapide des technologies de communication, l'avènement de la 5G promet non seulement une augmentation significative des vitesses de transmission de données mais aussi une réduction drastique de la latence. Ce projet de session s'inscrit dans cette perspective en visant à approfondir la compréhension des performances et des défis associés à l'intégration des applications dans les réseaux 5G. Le cœur de ce projet repose sur l'extension des capacités d'un simulateur de réseau pour étudier spécifiquement le comportement de différentes applications dans un contexte 5G. Trois applications ont été choisies pour leur pertinence et leurs exigences distinctes en matière de performances réseau : le streaming de vidéo 4K, le contrôle manuel de drone, et la détection d'automobile par capteurs optiques. L'objectif est de mesurer et d'analyser diverses métriques de performance afin d'identifier les défis spécifiques à chaque application, et les implications de leur interaction mutuelle sur la performance globale du réseau. Les hypothèses faites sur la norme 5G et métriques de performances considérées sont inspirées du mémoire de Victor Boutin [1].

2 Présentation général des application à considérer

2.1 Streaming 4K

Description : Cette application concerne la diffusion de contenu vidéo en résolution 4K, qui nécessite une bande passante élevée et une faible latence pour maintenir une expérience utilisateur fluide et sans interruption.

Importance dans le 5G : Le streaming 4K est particulièrement pertinent pour le réseau 5G car il démontre la capacité du réseau à gérer des données à haut débit et à offrir une qualité de service supérieure.

2.2 Contrôle manuel de drone

Description : Le contrôle de drone fait référence à l'opération à distance de drones pour diverses applications, telles que la surveillance ou la livraison. Cela implique une communication en temps réel avec des exigences strictes en matière de latence.

Importance dans le 5G : Dans un réseau 5G, le contrôle de drone bénéficie de la faible latence et de la fiabilité élevée, permettant des réponses quasi instantanées et une meilleure sécurité opérationnelle.

2.3 Détection d'automobile

Description : Cette application implique l'utilisation de capteurs et de caméras pour détecter et suivre les véhicules, souvent utilisée dans le cadre de systèmes de transport intelligents.

Importance dans le 5G : Avec le 5G, la détection d'automobile peut être améliorée grâce à une meilleure connectivité et à la possibilité de traiter de grandes quantités de données en temps réel, ce qui est crucial pour la sécurité et l'efficacité des transports.

3 Modélisation du simulateur

3.1 Description du simulateur

Le simulateur développé lors de ce projet conserve le même principe de fonctionnement que celui du laboratoire 3. À titre de rappel, l'objectif fondamental de laboratoire est de créer une infrastructure permettant d'établir des associations entre les différentes antennes et les équipements utilisateurs (UE). Pour ce faire, les coordonnées spatiales des antennes et des UE sont générées aléatoirement, ce qui influe sur les pertes dans l'espace libre.

3.2 Changements et Ajouts

À la conclusion du laboratoire 3, nous avons pu obtenir des informations telles que le nombre de bits envoyés par chaque UE pour chaque intervalle de temps (slot), le nombre de bits reçus par

chaque antenne, ainsi que la liste des UE qui envoient pendant chaque slot.

Pour améliorer le simulateur par rapport au laboratoire 3, plusieurs ajouts ont été réalisés :

- **Fichier de Cas :** Une section dédiée a été ajoutée au fichier de cas pour spécifier les paramètres de l'environnement 5G, notamment la vitesse de traitement des paquets, le nombre de sous-porteuses par ressource block, le nombre de symboles par slot de temps, et la valeur du overhead.
- **Fichier de Devices :** Concernant le fichier de devices, des informations supplémentaires ont été incluses concernant la génération de paquets, telles que la loi probabiliste, le temps inter-arrivée, et la longueur des paquets pour chaque type d'application.

Ces données servent de configuration pour le simulateur et peuvent être facilement modifiées via des fichiers de configuration sans nécessiter de modifications directes dans le code du programme. Lorsque le programme est exécuté, il remplit les valeurs pertinentes dans les attributs des classes *Antenna* et/ou *UE* pour faciliter le traitement. Ensuite, les résultats de la simulation peuvent être affichés et analysés. De plus, la classe *Packet* indiquant la taille et la date d'ajout des paquets dans la file d'attente des UEs a été ajoutée pour optimiser le processus de simulation lors du renvoi des paquets.

3.3 Description des modules

Cette section décrit les éléments clés du simulateur de réseau sans-fil, y compris l'allocation des blocs de ressources (RB), la gestion de la transmission de paquets, et la fonction du planificateur (scheduler) dans la coordination des interactions entre les équipements utilisateurs (UE) et le tampon. Elle vise à clarifier la contribution de chaque composant au fonctionnement global du simulateur.

3.3.1 Allocation de Ressource Blocks (RB) aux UEs

À chaque début de créneau de transmission (slot), le module d'attribution des Resource Blocks (RB) aux UEs adopte une stratégie d'allocation basée sur le principe du premier arrivé, premier servi pour les équipements utilisateurs (UE) désirant initier une transmission. La priorité est accordée en fonction de la séquence d'arrivée des demandes de transmission de chaque UE. L'instant de début de la transmission pour un UE donné est défini par l'attribut *start_TX* au sein de sa classe. Dans le code, c'est la fonction *allocate_resource_blocks_to_ues()* qui s'occupe de gérer l'allocation des RB aux UEs. Nous avons choisi de faire une allocation de type "premier arrivé premier servi" pour les UEs car c'est en pratique ce qu'il risque d'arriver lors du déploiement de réseaux 5G (en raison de la simplicité d'implémentation avec les systèmes physiques en place).

3.3.2 Traitement et Transmission de paquets

Le traitement d'un bit depuis n'importe quelle application (1, 2 ou 3) nécessite le même temps, indiquant ainsi une vitesse de traitement constante, indépendamment de l'application concernée. Cette vitesse de traitement est fixée à 2 Gbps, et est spécifiée dans le fichier de cas avec le paramètre *true_processing_speed*. Une fois traités, les paquets sont acheminés de l'équipement utilisateur (UE) vers une antenne. Ce processus est influencé principalement par deux éléments : la vitesse de traitement prédéfinie et la vitesse de transmission qui suit. La vitesse de transmission, contrairement à la vitesse de traitement, est variable. Elle dépend du nombre de RB alloués à l'UE et des conditions du réseau, en particulier du Channel Quality Indicator (CQI) et du niveau de congestion. La transmission de données est un processus dynamique où le nombre de RB alloués est converti en une quantité équivalente de bits à transmettre (N_{info}) grâce à la formule (1), version simplifiée du calcul du TBS dans [1].

$$N_{info} = N_{RB} * N_{RE}^{RB} * efficiency \quad (1)$$

Cette quantité est ensuite déduite du total de bits à envoyer. Les bits restants du paquet, non transmis par manque de RB disponibles lors de l'allocation, sont mis en attente dans la file d'attente

de l'UE. Ils seront retransmis lors d'un prochain sondage (polling) par l'antenne (voir section Planificateur et Tampon).

3.3.3 Planificateur (Scheduler) et Tampon (Buffer)

Le planificateur de renvoi de paquets est géré avec la fonction *renvoyer_paquets_du_buffer()*. La retransmission de données depuis le tampon se fait uniquement lors de l'absence de requêtes d'envoi de nouveau paquets de la part d'autres équipements utilisateurs (UE). Les UE sont ici sélectionnés pour la retransmission selon un ordre basé sur leur identifiant (ID), en privilégiant ceux avec l'ID le plus faible. Le planificateur gère cette procédure en attribuant les RB et en interrogeant chaque UE pour orchestrer l'envoi des données. Cette approche assure une gestion ordonnée et structurée des transmissions. En ce qui concerne le tampon, nous avons choisi une taille de tampon indéfinie pour chaque UE, et lorsque le tampon a l'occasion d'envoyer des paquets, celui-ci donne la priorité aux paquets qui sont rentrés en premier dans le tampon.

3.3.4 Association de CQI pour chaque UE

On utilise les tableaux pris de [2] pour associer une valeur d'efficacité au CQI de l'UE. 3 tableaux (tableaux 5.2.2.1) sont laissés à choisir, le choix est laissé à l'utilisateur dans le programme. La fonction *estimate_cqi_from_pathloss()* est utilisé pour estimer le CQI à partir du pathloss mesuré. Elle cherche un seuil de pathloss que le signal dépasse et attribue un indice CQI basé sur ce seuil à l'aide d'une des tables. Le pathloss entre une antenne et un UE est calculé et un CQI est attribué en consultant la table CQI appropriée qui transforme le pathloss en un indice CQI et une efficacité de transmission. Ce CQI est ensuite associé à l'UE correspondant.

4 Méthodologie et Tests

4.1 Sélection des paramètres de test

Ce simulateur permet d'évaluer l'effet de différents paramètres sur les performances d'un réseau 5G simulé. Les paramètres testables comprennent la largeur de bande (en RB), l'espacement des sous-porteuses, les conditions du réseau (pathloss et CQI), la capacité du tampon de données, et l'intervalle de temps entre les paquets. L'analyse vise à déterminer l'influence de chaque paramètre sur les performances des applications, tant individuellement que dans leur ensemble. Par défaut nous lançons la simulation de 0s à 1s en alternant le nombre d'UE (et donc le type d'applications présentes) entre chaque simulation.

4.1.1 Largeur de bande

Les antennes sélectionnées pour les tests sont Antenne 7 pour FR1 et Antenne 3 pour FR2. Les largeurs de bande des antennes FR1 et FR2 choisies sont tirées des tableaux 5.3.2-1 de [3] et [4] respectivement. Les antennes FR1 auront des plus petites largeurs de bande que les antennes FR2 car pour un même nombre de RB, la bande FR1 est beaucoup plus restreinte et peuplée puisque leur espacement entre sous-porteuse est plus petit. Par exemple, les antennes FR1, avec une largeur de bande de 40 MHz et un espacement de 15 kHz, offrent une capacité plus limitée (216 RB) en raison de leur bande plus restreinte et d'un espacement sous-porteuse plus serré. À l'opposé, les antennes FR2 utilisent une largeur de bande de 200 MHz et un espacement de 60 kHz, permettant d'atteindre 264 RB. Cette configuration montre que, malgré une largeur de bande supérieure, le nombre de RB est comparable, grâce à un espacement sous-porteuse plus large dans FR2.

En outre, la durée d'un slot pour FR1 est de 1 ms, tandis que pour FR2, elle est réduite à 0,25 ms, en raison de l'espacement quadruplé des sous-porteuses. Cette différence signifie que FR2 peut accueillir quatre fois plus de slots temporels que FR1 dans le même intervalle de simulation.

4.1.2 Longueur de paquets

Pour chaque application, la longueur varie selon une loi probabiliste spécifique, comme indiqué dans les directives.

4.1.3 Conditions de réseau (pathloss/CQI)

Le Coefficient de Qualité de l'Information (CQI) varie en fonction du pathloss, qui peut aller de 0 à 140 dB, reflétant les conditions de signal dans les zones urbaines et rurales. À proximité des stations de base, où le pathloss est minimal, des CQI élevés sont utilisables, permettant des communications à haut débit. Avec l'augmentation de la distance ou la présence d'obstacles, le pathloss s'accroît, nécessitant l'ajustement du CQI pour maintenir une transmission de qualité. Ce dernier, entre autre, varie avec la distance entre les antennes et les UEs, qui est générée de manière aléatoire, suite à la création aléatoire des coordonnées des antennes et des UE.

5 Résultats de Tests

5.1 Bande de Fréquence FR1

5.1.1 Les trois applications fonctionnant séparément

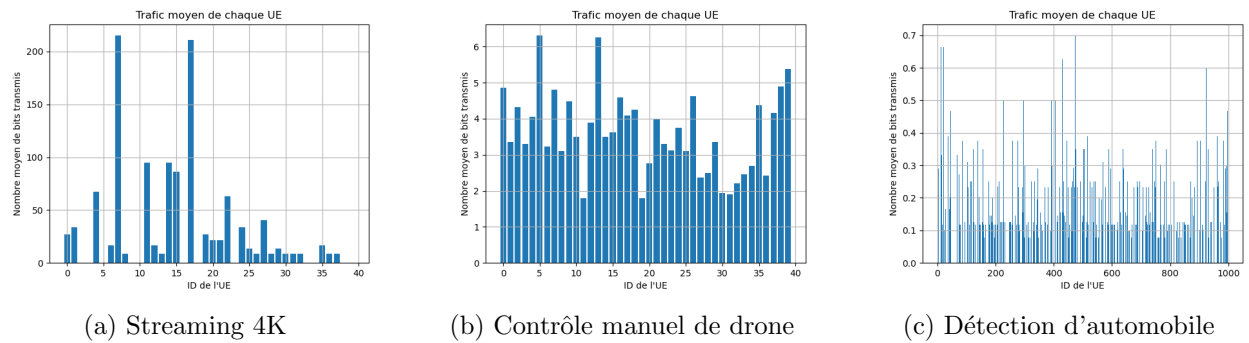


FIGURE 1 – Trafic moyenne des par UE

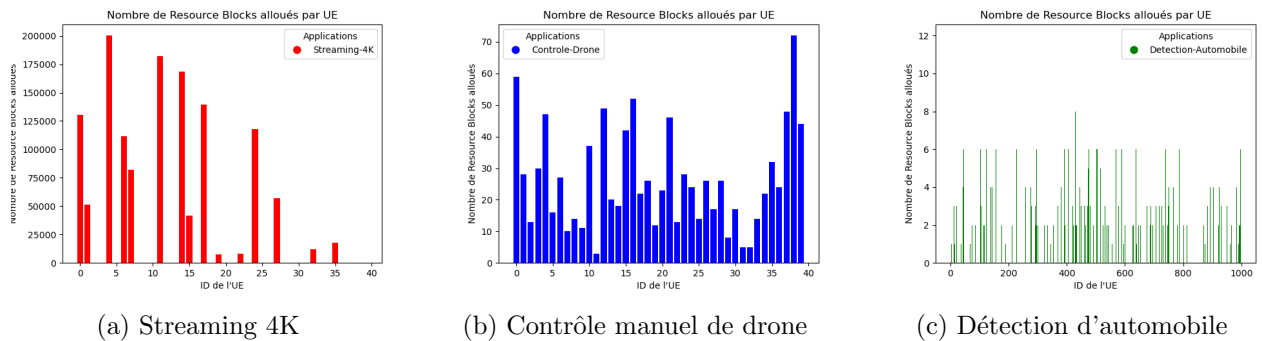
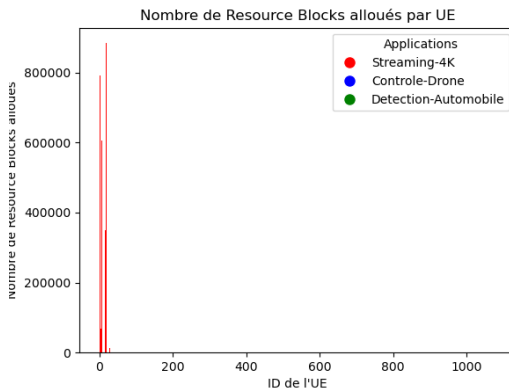
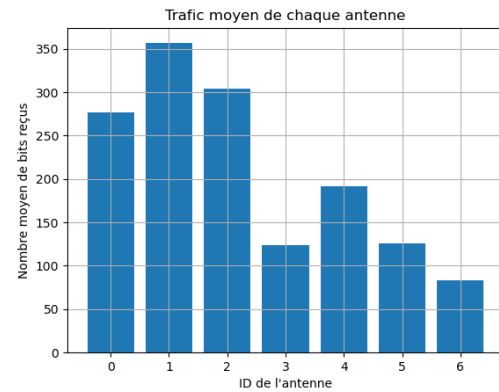


FIGURE 2 – Nombre de RB allouées par UE

5.1.2 Les trois applications combinées



(a) Nombre de RB allouées par UE

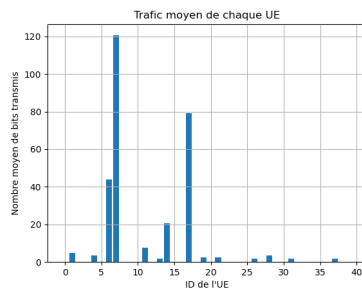


(b) Trafic moyenne des antennes

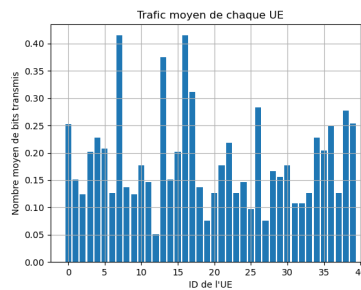
FIGURE 3 – Nombre de RB alloués UE (à gauche) et le trafic moyen des antennes (à droite)

5.2 Bande de Fréquence FR2

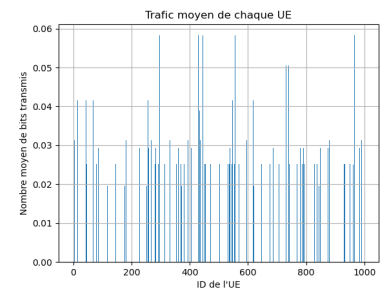
5.2.1 Les trois applications fonctionnant séparément



(a) Streaming 4K



(b) Contrôle manuel de drone



(c) Détection d'automobile

FIGURE 4 – Trafic moyenne des par UE

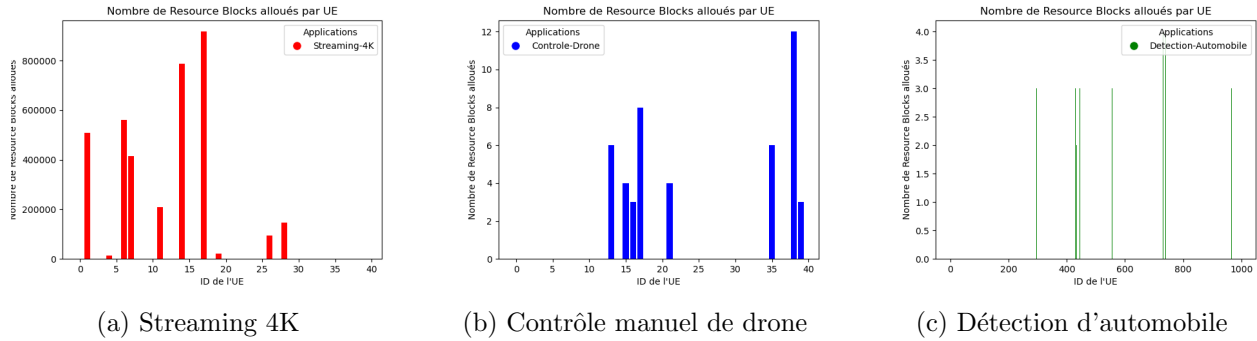


FIGURE 5 – Nombre de RB allouées par UE

5.2.2 Les Applications combinées

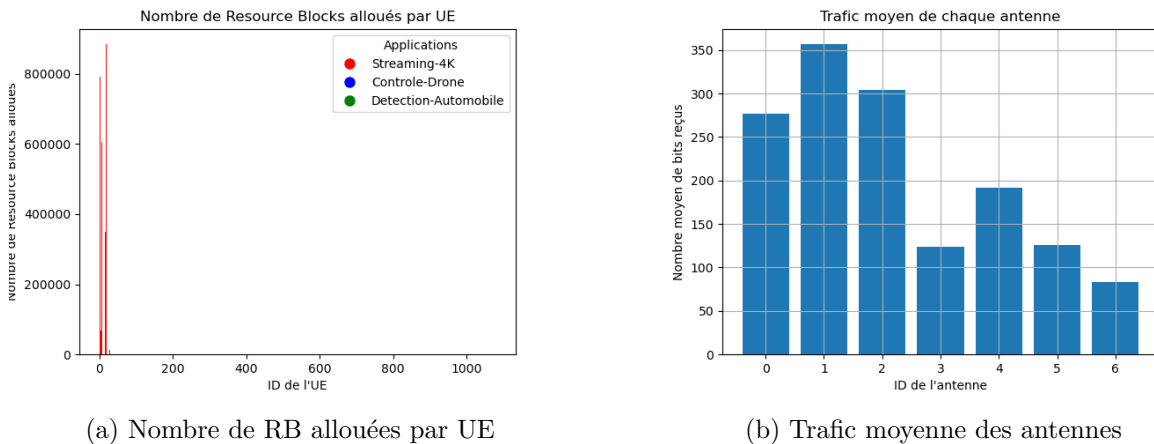


FIGURE 6 – Nombre de RB alloués UE (à gauche) et le trafic moyen des antennes (à droite)

6 Discussion de Résultats

6.1 Bande de Fréquence FR1

6.1.1 Les trois applications fonctionnant séparément

Les résultats obtenus démontrent une similitude dans la distribution des RB alloués à chaque UE selon le ID comparativement au nombre de bits moyens transmis. Ce résultat est consistant dans les trois application lorsqu'elles sont simulées séparément. Les résultats pour la détection d'automobile

en bande FR1 démontrent une correspondance entre la capacité du réseau et les exigences de l'application. Les graphiques montrent que même avec des variations de pathloss significatives, le CQI maintenu assure une transmission de données robuste et continue. Cela indique que le réseau peut gérer efficacement les applications critiques nécessitant une haute disponibilité et une faible latence.

6.1.2 Les trois applications combinées

L'analyse des applications combinées révèle que la superposition des services de streaming 4K, contrôle de drone, et surveillance via le réseau 5G FR1 est viable, bien que chaque service augmente la charge sur les ressources du réseau. Les graphiques pointent vers un besoin accru d'optimisation de l'allocation des ressources pour éviter la saturation du réseau, surtout pendant les pics d'utilisation.

6.2 Bande de Fréquence FR2

Ces fréquences sont utilisées dans les systèmes de communication à haute fréquence, telles que la 5G, pour des fréquences entre 24 250 MHz et 52 600 MHz, conformément aux spécifications de la norme [4]. Dans cette bande, les canaux étant plus larges, l'espacement entre les sous-porteuses doit être réduit pour maximiser l'utilisation du spectre et accroître la capacité du système. La Figure 2 et la Figure 1 illustrent respectivement le trafic moyen par UE et le nombre moyen de RB alloués par UE lorsque les applications fonctionnent séparément. En analysant le cas (a) de la Figure 1 et le cas (a) de la Figure 2, on constate que le trafic moyen de chaque UE ne suit pas la tendance de l'allocation des ressources. Contrairement à ce à quoi on aurait pu s'attendre, il y a une allocation limitée de blocs de ressources pour l'application, une contrainte imposée par les dispositions du tableau [2], qui indique un maximum de 264 blocs de ressources disponibles. Cette restriction rend apparent dans ces deux figures que l'application de streaming 4K ne fonctionne pas de manière optimale, car il est impossible d'envoyer des paquets complets pendant un slot. Selon la section 5.1.3.2 de la norme [2], les formules (1) et (2) permettent de déterminer le nombre de blocs de ressources requis par élément. Par exemple, en prenant 1 RB, le nombre de bits est d'environ

38. En multipliant ce chiffre par le RBmax, on obtient environ 100 032 bits, ce qui est nettement insuffisant par rapport à la longueur moyenne des paquets pour cette application, qui est de 400 000 bits. Concernant les cas (b) de la Figure 1 et de la Figure 2, qui représentent le trafic moyen de l'application de contrôle de drones et de détection d'automobiles, on observe généralement que le nombre de blocs de ressources alloués suit la tendance de transmission par rapport à l'application de streaming 4K, les paquets semblant être transmis intégralement car leur longueur est moindre (100 bits). Enfin, les cas (c) de la Figure 1 et de la Figure 2 montrent un fonctionnement similaire à celui des cas (b), avec la seule différence qu'il y a moins de blocs de ressources alloués.

6.2.1 Les trois applications fonctionnant séparément

Le streaming 4K bénéficie grandement de la haute bande passante et des fréquences élevées offertes par la bande FR2. Les graphiques montrent que le débit nécessaire pour le streaming 4K est maintenu sans interruption, ce qui assure une diffusion vidéo de haute qualité sans tampon. Le contrôle manuel de drone nécessite une très faible latence pour être efficace, et les résultats montrent que la bande FR2 est particulièrement apte à répondre à cette exigence.

6.2.2 Les trois applications combinées

Lorsque le streaming 4K, le contrôle manuel de drone, et la détection d'automobile sont combinés sur la bande FR2, les défis liés à l'allocation efficace des ressources blocs (RB) deviennent apparents. Les graphiques montrent une utilisation fluctuante des RB, indiquant une gestion active pour répondre aux exigences variables de chaque application. Le streaming 4K, avec ses besoins élevés en bande passante, semble occasionnellement empiéter sur les ressources nécessaires pour le contrôle de drone, qui requiert une faible latence. Parallèlement, la détection d'automobile, bien que moins affectée, pourrait également subir des retards, impactant potentiellement la rapidité et la précision des réponses en situation réelle.

7 Lien entre les résultats et l'implémentation du simulateur

Lors d'analyser les résultats de tests, on observe peu de différence entre les bandes FR1 et FR2, probablement en raison d'une surcapacité des ressources réseau pour les scénarios testés. Le simulateur, capable de générer des paquets de manière probabiliste et d'allouer des ressources de façon itérative par application, pourrait avoir souffert d'un manque de précision dû à un pas de temps (dt) trop large. Cela suggère que pour des simulations futures, une réduction du pas de temps pourrait permettre une analyse plus fine et plus représentative des impacts réels des différentes fréquences sur la performance du réseau.

7.1 Proposition d'amélioration du simulateur

Au niveau de l'allocation dynamique des ressources, intégrer des algorithmes d'ordonnancement plus sophistiqués qui prennent en compte les priorités des applications, leurs besoins en bande passante et leur sensibilité à la latence. Une autre proposition serait d'intégrer des modèles d'interférence plus complexes qui reflètent plus fidèlement les conditions réelles d'un environnement urbain dense, y compris les interférences non linéaires.

Une autre proposition d'amélioration serait de faire de la communication et gestion de ressource en downlink. En effet, nous nous sommes concentrés à faire de la communication et gestion de ressources en uplink. Une fois les paquets envoyés de l'UE jusqu'à l'antenne que doit faire l'antenne avec ce paquet ? On pourrait penser que les paquets se font retransmettre à d'autres UEs ou sont retransmis dans le core network de la 5G. Pour ce faire, il faudrait inclure dans la simulation de paquet un module de décision permettant de choisir quoi faire avec le paquet reçu. Il faudrait cependant faire attention à adapter adéquatement la fonction d'allocation de RB appelée à chaque slot afin qu'elle supporte et traque l'allocation en uplink et en downlink des RB.

Une dernière proposition serait d'introduire un délai d'accès dans les UEs à travers la création d'un attribut *access_delay* et d'un attribut *wake_status* dans la classe UE permettant de donner le temps moyen entre le moment où un paquet est généré et le moment où l'UE serait réveillée et

prête à transmettre. L'attribut *wake_status* servirait à décrire si l'UE est en mode active ou non.

8 Conclusion

En conclusion, les résultats obtenus à travers les différentes simulations sur les bandes FR1 et FR2 mettent en évidence l'importance cruciale de l'adaptation des stratégies de gestion des ressources dans un environnement réseau complexe. Le déploiement simultané de plusieurs applications à haut débit, telles que le streaming 4K, la détection d'automobile, et le contrôle de drones, sur une même bande de fréquence, révèle des interactions significatives entre la consommation de bande passante et les exigences de latence. Ces interactions soulignent la nécessité d'approches dynamiques et intelligentes pour l'allocation des ressources réseau, afin de maximiser l'efficacité tout en minimisant les interférences et les retards. Les graphiques issus des simulations démontrent que sans une gestion adéquate, les applications peuvent subir des dégradations de performance notables dues à la concurrence pour les ressources limitées. Enfin, l'analyse des performances sur les différentes bandes et configurations suggère que des améliorations du simulateur pourraient inclure une meilleure modélisation des scénarios d'usage réels et une optimisation des algorithmes de distribution des blocs de ressources.

9 Lien de code source pour la programmation et reproduction des données

Les informations concernant les algorithmes implémentés pour réaliser ce projet sont disponibles sur [Github](#) [5]

Références

- [1] Victor Boutin, “Modélisation et conception d’un simulateur 5g grande échelle [master’s thesis, polytechnique montréal].” <https://publications.polymtl.ca/9136/>, 2021.
- [2] Sophia Antipolis Valbonne, ““3gpp ts 38.214 v16.4.0;5g;nr; physical layer procedures for data (3gpp ts 38.214 version 16.4.0 release 16),” third generation partnership project,” https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138214/16.04.00_60/ts_138214v160400p.pdf, 2020.
- [3] —, ““3gpp ts 38.101-1 v17.5.0;5g;nr;user equipment (ue) radio transmission and reception;part 1 : Range 1 standalone,” third generation partnership project,” https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138101/17.05.00_60/ts_138101v170500p.pdf, 2020.
- [4] —, ““3gpp ts 38.101-2 v16.4.0;5g;nr;user equipment (ue) radio transmission and reception; part 2 : Range 2 standalone; (3gpp ts 38.101-2 version 16.4.0 release 16)” third generation partnership project,” https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138102/16.04.00_60/ts_138102v160400p.pdf, 2020.
- [5] Bouh Abdillahi, Vincent Yves Nodjom, Mohamed Anis Mekkaoui, Abdenour Taoufella, “Github du projet ele8702-h24-projet,” <https://github.com/konoDioDA253/ELE8702-H24-Projet>, 2024.