



**HAL**  
open science

# Gestion intelligente des ressources radios dans les réseaux véhiculaires de la 4G vers la 5G

Mariem Allouch Mahdi

► **To cite this version:**

Mariem Allouch Mahdi. Gestion intelligente des ressources radios dans les réseaux véhiculaires de la 4G vers la 5G. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Paris-Saclay, 2021. Français. NNT : 2021UPASG061 . tel-03576340

**HAL Id: tel-03576340**

**<https://theses.hal.science/tel-03576340v1>**

Submitted on 16 Feb 2022

**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.

**Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay**

École doctorale n° 580, Sciences et Technologies de  
l'Information et de la communication (STIC)  
Spécialité de doctorat : Réseaux, information et communications  
Unité de recherche : Université Paris-Saclay, UVSQ, LI PARAD, 78180,  
Saint-Quentin en Yvelines, France  
Réfèrent : Université de Versailles -Saint-Quentin-en-Yvelines

**Thèse présentée et soutenue à Paris-Saclay, le 30 novembre  
2021, par**

**Mariam ALLOUCH MAHDI**

**Composition du jury**

<b>Pascal LORENZ</b> Professeur des universités, Université de Haute Alsace	Président
<b>Mohamed Yacine GHAMRI-DOUDANE</b> Professeur des universités, Université La Rochelle	Rapporteur et Examineur
<b>Rami LANGAR</b> Professeur des universités, Université Marne la vallée	Rapporteur et Examineur
<b>Oyunchimeg SHAGDAR</b> Chef d'équipe R&D (HDR), VEDECOM	Examineur

**Direction de la thèse**

<b>Samir TOHME</b> Professeur émérite, Université Paris saclay UVSQ/LI- PARAD	Directeur de thèse
<b>Sondes KALLEL KHEMIRI</b> Maîtresse de conférences, Université Paris saclay UVSQ/DAVID	Co-encadrant
<b>Guy PUJOLLE</b> Professeur émérite, Sorbonne Université	Invité
<b>Tara YAHIYA</b> Maîtresse de conférences (HDR), Université Paris Sa- clay/LISN	Invité



## Remerciements

Je souhaite remercier en premier lieu mon directeur de thèse, M. SAMIR TOHME, je lui suis également reconnaissante pour le temps conséquent qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

Je tiens à adresser ma profonde gratitude à mes encadrants : Mme. SONDES KALLEL et M. AHMED SOUA qui ont dirigé mes travaux. Merci pour tout le temps consacré, les conseils et le soutien que vous m'avez apporté tout au long de ma thèse.

Je voudrais remercier les rapporteurs de cette thèse M. RAMI LANGAR, professeur à l'université Paris-Est Marne la vallée et M. MOHAMED YACINE GHAMRI-DOUDANE, professeur à l'université La Rochelle, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Je remercie également Mme OYUNCHIMEG SHAGDAR chef d'équipe R&D à Vedecom (HDR), Mme TARA ALI YAHIA maitresse de conférences (HDR) au LISN université Paris Saclay et M. GUY PUJOLLE professeur émérite à Sorbonne Université, d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse et M. PASCAL LORENZ professeur à l'université de Haute Alsace, d'avoir accepté la présidence de mon jury de thèse.

Un grand merci à tous les membres du laboratoire LI-PARAD de l'université de Versailles, ainsi que mes collègues à l'institut VEDECOM. J'ai eu vraiment beaucoup de plaisir à y côtoyer les gens et à travailler avec eux. Les échanges ont toujours été source d'enrichissement et dans un respect mutuel.

Enfin, un immense merci à mes chers parents Abdelhafidh et Najoua, à mon mari Mohamed, ma sœur Fatma, à ma grand-mère Aicha, mes beaux-parents Mohamed et Hedia, mes belles sœurs Khouloud et Ons, et à toute ma famille en particulier mon oncle Mohamed et ma tante Moufida, pour leur soutien, leur confiance en moi et leurs encouragements sans faille.



## Résumé

Les réseaux véhiculaires constituent une classe de réseaux mobiles à part entière présentant l'originalité de permettre aux véhicules de communiquer les uns avec les autres dans le cadre d'une mobilité spatiale élevée ainsi qu'avec les réseaux cellulaires et les réseaux de communication déployés sur l'infrastructure routière. En vue de supporter les communications des véhicules autonomes de niveau 5, ces réseaux doivent offrir une QoS adaptée aux contraintes temporelles critiques des communications tout en garantissant un haut niveau d'intégrité des données échangées. La technologie LTE utilisée dans les réseaux mobiles cellulaires et qui est dotée d'un cadre rigoureux de QoS a été choisie par le 3GPP (Release 14) pour la communication dans les réseaux véhiculaires sous la référence LTE-V2X/cellular V2X. La Release 14 introduit deux modes (3,4) de communication LTE spécialement conçus pour les communications V2V. Dans le mode 3, la sélection des canaux radios est gérée par la station de base eNodeB. Dans le mode 4, les véhicules sélectionnent leurs ressources radio d'une manière autonome indépendamment de toute couverture du réseau cellulaire. Dans la littérature, différents algorithmes d'allocation de ressources pour les modes 3 et 4 ont été proposés. Dans la première partie de la thèse, on s'intéresse au mode 3 qui répond aux besoins du monitoring des véhicules autonomes de niveau 5 par l'infrastructure déployée sur la route et dans le Cloud. Une étude exhaustive des propositions existantes dans littérature montre que la majorité des solutions proposées ne traitent que les messages périodiques (non-safety ex. CAM) tout en assurant un minimum de sécurité. Donc, nous avons introduit les messages aperiodiques (safety ex. DENM) qui sont générés dans des situations critiques (accident, bouchon). Nous avons proposé une politique d'allocation des ressources basée sur un système de priorité avec la garantie stricte d'une capacité minimale pour les applications critiques et un partage dynamique de la capacité restante avec les autres applications. Nous avons proposé également une nouvelle technique de réutilisation des ressources pour les deux types de messages (critiques et moins critiques) qui permet d'utiliser efficacement la capacité du réseau tout en satisfaisant les exigences des applications critiques sans pénaliser les applications moins critiques. La technologie LTE-V présente une étape importante vers le réseau V2X/5G. Ce réseau 5G offre, par le biais de l'URLLC, une haute intégrité et une faible latence pour les applications temps réel critiques. De plus, avec le concept du « Network Slicing », l'architecture fonctionnelle du réseau 5G offre la portabilité du réseau véhiculaire avec ses services à côté d'autres réseaux de services au sein du réseau mobile 5G. Nous avons choisi d'intégrer l'architecture du réseau véhiculaire 5G dans un même slice au niveau du

réseau d'accès ce qui permet de bénéficier du gain statistique en termes de l'utilisation des ressources radios. On s'est intéressé aux couches MAC et physique NR. Nous avons étudié l'allocation dynamique des ressources radios entre les communications URLLC critiques et les communications de streaming portés dans un même Slice. L'ordonnanceur utilisé pour l'allocation des ressources est spécifié pour gérer dynamiquement les ressources spectrales entre les flux URLLC critiques et les flux de streaming échangés entre véhicules et les serveurs d'applications. Nous avons proposé plusieurs modèles statistiques de flux échangés et analysé par simulation la QoS offerte dans le réseau d'accès aux flux critiques/streaming. Nous avons également proposé un modèle analytique markovien quasi-exact de la traversée des couches MAC/Physique du flux URLLC avec comme objectif de dimensionner un mécanisme de contrôle d'admission (CAC) des flux critiques dans le slice et de garantir la QoS requise par ces flux.

## Abstract

Vehicular networks are a class of mobile networks allowing vehicles to communicate with each other in the context of high spatial mobility, as well as with cellular networks and communication networks deployed on the road infrastructure. In order to support Level 5 autonomous vehicle communications, these networks need to provide a QoS that addresses the time-critical constraints of communications while ensuring a high level of integrity of the data exchanged. The LTE technology, used in cellular mobile networks with a strict QoS, has been selected by 3GPP (Release 14) for communication in vehicular networks under the reference LTE-V2X/ cellular V2X. Release 14 introduces two modes (3,4) of LTE communication specifically designed for V2V communication. In mode 3, radio channel selection is managed by the eNodeB base station. In Mode 4, vehicles select their radio resources autonomously regardless of any cellular network coverage. In the literature, different resource allocation algorithms for modes 3 and 4 have been proposed. In the first part of the thesis, we focus on mode 3 addressing the requirements of monitoring level 5 autonomous vehicles through the infrastructure deployed on the road and in the Cloud. An exhaustive study of the existing proposals in the literature shows that the majority of the proposed solutions only deal with periodic messages (non-safety e.g. CAM) while ensuring a minimum of security. Therefore, we introduced aperiodic messages (safety ex. DENM) which are generated in critical situations (accident, traffic jam). We proposed a resource allocation policy based on a priority system with a strict guarantee of minimum capacity for critical applications and a dynamic sharing of the remaining capacity with other applications. We also proposed a new resource reuse technique for both types of messages (critical and less critical) that allows efficient use of network capacity while satisfying the requirements of critical applications without affecting less critical applications. LTE-V technology presents an important step towards the V2X/5G network. This 5G network offers, through URLLC, high integrity and low latency for real-time critical applications. Furthermore, with the concept of "Network Slicing", the functional architecture of the 5G network offers the portability of the vehicular network with its services alongside other service networks within the 5G mobile network. We have chosen to integrate the 5G vehicular network architecture in the same slice at the access network level which allows to benefit from the statistical gain in terms of radio resources utilization. We focused on the MAC and physical NR layers. We studied the dynamic allocation of radio resources between critical URLLC communications and streaming communications carried in the same Slice. The scheduler used for resource allocation is specified to dynamically manage spectral resources between critical URLLC



flows and streaming flows exchanged between vehicles and application servers. We proposed several statistical models of exchanged flows and analyzed by simulation the QoS offered in the access network to critical/streaming flows. We have also proposed a quasi-exact Markovian analytical model of the MAC/Physical layer traversal of the URLLC flow with the objective of dimensioning an admission control mechanism (CAC) of the critical flows in the slice and to guarantee the QoS required by these flows.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>11</b>
1.1	Contexte et problématique de la thèse . . . . .	11
1.2	Contributions . . . . .	12
1.3	Organisation du manuscrit . . . . .	13
1.4	Publications . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Etat de l’art</b>	<b>15</b>
2.1	Introduction . . . . .	15
2.2	LTE-V : Architecture et allocation des ressources radios . . . . .	15
2.2.1	Architecture LTE-V . . . . .	15
2.2.2	Allocation des ressources dans la LTE-V . . . . .	19
2.2.3	Problématique . . . . .	40
2.3	5G-V2X :Architecture et gestion des ressources radios pour les communications 5G-URLLC . . . . .	43
2.3.1	Architecture et Nouvelle Radio de la 5G . . . . .	43
2.3.2	Solution de Slicing dans la 5G . . . . .	49
2.4	Conclusion . . . . .	52
<b>3</b>	<b>Proposition PEARL pour l’allocation des ressources radios dans LTE-V mode 3</b>	<b>55</b>
3.1	Introduction . . . . .	55
3.2	Priority and guaranteed Resource Allocation approach (PEARL)	55
3.3	Evaluation des performances et résultats . . . . .	58
3.3.1	Paramètres de simulation . . . . .	58
3.3.2	Résultats . . . . .	59
3.4	Conclusion . . . . .	65
<b>4</b>	<b>Proposition PEARL-RM pour l’allocation des ressources radios dans LTE-V mode 3</b>	<b>67</b>
4.1	Introduction . . . . .	67

4.2	Priority and guaranteed-based Resource allocation approach with Reuse Mechanism (PEARL-RM) . . . . .	68
4.3	Paramètres de Simulation et résultats . . . . .	71
4.3.1	Paramètres de simulation . . . . .	71
4.3.2	Résultats de simulation . . . . .	71
4.4	Conclusion . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Analyse par simulation des performances de la politique proposée de l'allocation des ressources radios mono-slice dans la 5G</b>	<b>81</b>
5.1	Introduction . . . . .	81
5.2	Description du modèle et algorithme proposé . . . . .	82
5.2.1	Applications considérées dans le système . . . . .	82
5.2.2	La méthode de la gestion des slots radios entre les deux types d'application . . . . .	82
5.2.3	Modèle de trafic d'arrivées . . . . .	84
5.2.4	Modélisation par la chaîne incluse . . . . .	84
5.3	Simulation du système à deux classes et résultats . . . . .	91
5.3.1	Paramètres de simulation . . . . .	91
5.3.2	Paramètres de performances étudiés . . . . .	92
5.3.3	Résultats de simulation . . . . .	93
5.4	Conclusion . . . . .	105
<b>6</b>	<b>Modèle analytique de la classe critique</b>	<b>107</b>
6.1	Introduction . . . . .	107
6.2	Calcul de la distribution du nombre de clients dans le système en régime stationnaire aux instants de départ . . . . .	108
6.3	Analyse de la distribution du délai . . . . .	120
6.4	Calcul du délai moyen . . . . .	124
6.5	Validation du modèle analytique de l'allocation de ressources radio V2X dans 5G par simulation . . . . .	125
6.5.1	Distribution de probabilité du nombre de clients . . . . .	125
6.5.2	Délai moyen (temps de séjour moyen) . . . . .	128
6.6	Conclusion . . . . .	129
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>131</b>
7.1	Bilan des travaux . . . . .	131
7.2	Perspectives . . . . .	133
7.2.1	Pourcentage des ressources radios garanties . . . . .	133
7.2.2	Hypothèse de troncature de la distribution de probabilité pour la classe 2 . . . . .	133
7.2.3	Variation du facteur de charge du système $\rho$ . . . . .	135

<i>TABLE DES MATIÈRES</i>	5
7.2.4 Network Slicing . . . . .	136
<b>Annexe A Calcul des Arrivées</b>	<b>137</b>
<b>Annexe B Calcul des départs</b>	<b>141</b>
<b>Annexe C Calcul du nombre moyen des clients dans le système</b>	<b>145</b>
<b>Annexe D Lois d'arrivées</b>	<b>151</b>
D.1 Distribution hyper-exponentielle . . . . .	151
D.2 Distribution d'Erlang d'ordre $k$ . . . . .	153



# Table des figures

1.1	Problématique de la thèse. . . . .	13
2.1	Architecture LTE-V. . . . .	16
2.2	Communication modes in LTE-V . . . . .	17
2.3	Types de subcanalisation. . . . .	18
2.4	Taxonomie pour l'allocation des ressources pour la LTE-V . . . . .	20
2.5	Fenêtres de détection et de sélection pour SPS . . . . .	20
2.6	Procédure SPS . . . . .	21
2.7	Architecture 5G-V2X [50] . . . . .	44
2.8	Les services de la 5G [51] . . . . .	45
2.9	Espacement flexible des sous-porteuses [55] . . . . .	46
2.10	Structure de la trame 5G NR [56] . . . . .	47
2.11	Variation de la durée des créneaux[55] . . . . .	48
2.12	Structure de la trame NR [55] . . . . .	49
2.13	Exemple de Slices V2X [69] . . . . .	52
3.1	Description du système . . . . .	56
3.2	Schéma proposé pour le partage des ressources . . . . .	57
3.3	Variation du PRR de PEARL DENM pour N=50 . . . . .	60
3.4	Variation du PRR de PEARL CAM pour N=50 . . . . .	61
3.5	Variation du PRR de PEARL DENM pour N=400 . . . . .	62
3.6	Variation du PRR de GRA-SM DENM pour N=1000 . . . . .	63
3.7	Variation du PRR de PEARL DENM pour N=1000 . . . . .	63
3.8	Variation du UD de PEARL DENM pour N=1000 . . . . .	64
3.9	Variation du UD de GRA-SM DENM pour N=1000 . . . . .	65
4.1	Schéma proposé pour le partage des ressources . . . . .	68
4.2	Variation du PRR de DENM pour N=50 . . . . .	72
4.3	Variation du PRR de CAM pour N=50 . . . . .	73
4.4	Variation du PRR de DENM pour N=400 . . . . .	74
4.5	Variation du PRR de CAM pour N=400 . . . . .	75

4.6	Variation du PRR de DENM pour N=1000 . . . . .	76
4.7	Variation du PRR de CAM pour N=1000 . . . . .	76
4.8	Variation du UD de DENM pour N=400 . . . . .	77
4.9	Variation de UD de CAM pour N=400 . . . . .	78
4.11	Variation de UD de CAM pour N=1000 . . . . .	78
4.10	Variation de UD de DENM pour N=1000 . . . . .	79
5.1	Partionnement des slots radios . . . . .	83
5.2	Variation du délai de la classe 1 en fonction des lois d'arrivées . . . . .	94
5.3	Variation du délai de la classe 2 en fonction des lois d'arrivées . . . . .	95
5.4	Distribution de probabilité du nombre de clients de la classe 1 en slots avec $\rho_2=0.06\rho$ . . . . .	95
5.5	Distribution de probabilité de nombre de clients de la classe 2 en slots $\rho_2=0.06\rho$ . . . . .	96
5.6	Distribution de probabilité du nombre de clients de la classe 1 en slots $\rho_2=0.2\rho$ . . . . .	96
5.7	Distribution de probabilité de nombre de clients de la classe 2 en slots $\rho_2=0.2\rho$ . . . . .	97
5.8	Distribution de probabilité du nombre de clients de la classe 1 en slots $\rho_2=0.3\rho$ . . . . .	98
5.9	Distribution de probabilité de nombre de clients de la classe 2 en slots $\rho_2=0.3\rho$ . . . . .	99
5.10	Distribution de probabilité du délai de la classe 1 $\rho_2=0.06\rho$ . . . . .	100
5.11	Distribution de probabilité du délai de la classe 2 $\rho_2=0.06\rho$ . . . . .	101
5.12	Distribution de probabilité du délai de la classe 1 $\rho_2=0.2\rho$ . . . . .	101
5.13	Distribution de probabilité du délai de la classe 2 $\rho_2=0.2\rho$ . . . . .	102
5.14	Distribution de probabilité du délai de la classe 1 $\rho_2=0.3\rho$ . . . . .	103
5.15	Distribution de probabilité du délai de la classe 2 $\rho_2=0.3\rho$ . . . . .	104
5.16	Délai moyen en fonction des arrivées de la classe 2 . . . . .	105
6.1	Distribution de probabilité du nombre du clients de la classe 2 $\rho_2=0.06\rho$ . . . . .	126
6.2	Distribution de probabilité du nombre du clients de la classe 2 $\rho_2=0.2\rho$	126
6.3	Distribution de probabilité du nombre du clients de la classe 2 $\rho_2=0.3\rho$	127
6.4	Temps de séjour moyen de la classe 2 (délai moyen) . . . . .	129

# Liste des tableaux

2.1	Allocation de ressources basée sur la détection pour le mode 4 . . .	23
2.2	Allocation des ressources basée sur les interférences pour le mode 3	27
2.3	Allocation de ressources basée sur les interférences pour mode 4 . . .	31
2.4	Allocation de ressources basée sur la QoS dans le mode 3 . . . . .	35
2.5	Comparaison des algorithmes d'allocation de ressources basés sur les interférences et la détection en mode 4 . . . . .	37
2.6	Résumé des algorithmes d'allocation de ressources basés sur les interférences et la QoS . . . . .	39
3.1	Paramètres de simulation . . . . .	59
4.1	Paramètres de simulation . . . . .	71
5.1	Les départs $D_{2,n}$ . . . . .	88
5.2	Les départs $D_{1,n}$ . . . . .	89
5.3	Paramètres de simulation . . . . .	92
B.1	Les départs $D_{2,n}$ . . . . .	141
B.2	Les départs $D_{1,n}$ . . . . .	142





# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Contexte et problématique de la thèse

Les réseaux véhiculaires constituent une classe de réseaux mobiles à part entière présentant l'originalité de permettre aux véhicules de communiquer les uns avec les autres dans le cadre d'une mobilité spatiale élevée et un haut niveau d'autonomie. Il existe différentes technologies qui assurent la communication entre les différentes entités des réseaux véhiculaires (véhicule, infrastructure, piéton et réseau). Parmi ces technologies, la technologie LTE qui est connue pour les réseaux cellulaires. Cette technologie, proposée par la 3GPP release 14 [1], [2], a été candidate pour garantir la communication dans le monde véhiculaire et fait référence à LTE-V2X ou cellular V2X (C-V2X) ou encore LTE-V. Le sujet de la thèse se focalise en première partie sur la technologie LTE-V et plus particulièrement sur la gestion de l'allocation des ressources radios pour la communication directe (véhicule à véhicule). Ce mode de communication directe est basé sur les communications Device to Device (D2D) définies dans le cadre des services basés sur la proximité (ProSe) dans les versions 12 et 13 de LTE et introduit une nouvelle interface D2D (appelée PC5, également appelée "sidelink"). LTE sidelink (ou D2D) comprend deux modes de fonctionnement pour la gestion des ressources radios : mode 1 et mode 2. Les véhicules connectés nécessitent des communications V2X hautement fiables et à faible latence, pour cette raison, 3GPP Release 14 [3], [4], [5] introduit deux nouveaux modes de communication (modes 3 et 4) spécialement conçus pour les communications V2V. En mode 3, la sélection des sous-canaux est gérée par la station de base ou eNodeB, cependant en mode 4, les véhicules sélectionnent leurs ressources radio d'une manière autonome indépendamment s'ils sont sous couverture du réseau cellulaire ou pas. La thèse s'intéresse à étudier deux parties comme l'indique la figure 1.1

- Partie I : Allocation des ressources radios dans LTE-V
- Partie II : Allocation des ressources radios dans le contexte 5G-URLLC

Dans la première partie de la thèse, on s'intéresse à la proposition des algorithmes d'allocation de ressources radios dans LTE-V mode 3. Ces propositions prennent en considération les exigences des différents types d'applications en termes de haute fiabilité et faible latence. Nous proposons une approche d'allocation des ressources basée sur la priorité et la garantie, qui réserve d'abord une capacité garantie pour les applications critiques et partage la capacité restante avec d'autres types de trafic moins critiques. Cette approche permet de protéger le trafic prioritaire surtout dans les réseaux avec forte densité routière. Dans un deuxième lieu, nous proposons une autre approche. Cette dernière introduit le mécanisme de garantie ainsi que celui de la priorité comme l'approche décrite ci-dessus. Elle introduit aussi la technique de réutilisation des ressources pour les deux types de messages (critiques et moins critiques) afin d'utiliser efficacement la capacité du réseau. Cette nouvelle approche permet en effet de satisfaire les exigences des applications les plus critiques sans pénaliser celles les moins critiques. La technologie LTE-V présente une étape de transition vers la nouvelle génération 5G. A travers le service URLLC, la 5G permet de garantir la très haute fiabilité et la faible latence pour les applications temps réel critiques. Dans cette partie de la thèse, on s'intéresse à la couche MAC qui sera portée par la nouvelle couche physique NR/5G. Nous étudions l'allocation dynamique des ressources radios entre les communications URLLC critiques et les communications de streaming qui sont moins critiques en termes de contraintes temporelles portés dans un même slice. Nous proposons plusieurs modèles statistiques de flux échangés et analysé finement par simulation la QoS offerte dans le réseau d'accès aux flux critiques/streaming. Nous proposons également un modèle analytique markovien quasi-exact de la traversée des couches MAC/Physique du flux URLLC critique avec comme objectif de spécifier et dimensionner un mécanisme de contrôle d'admission (CAC) des flux critiques dans le slice en vue de garantir la QoS requise par ces flux.

## 1.2 Contributions

Nous avons trois contributions principales

- PEARL : ce travail propose une nouvelle programmation des ressources radio pour les communications V2X en mode LTE-V 3 qui garantit un minimum de ressources radio pour les messages de sécurité et introduit un mécanisme de transmission prioritaire pour les ressources partagées restantes afin de donner la priorité aux messages d'urgence, en particulier dans les

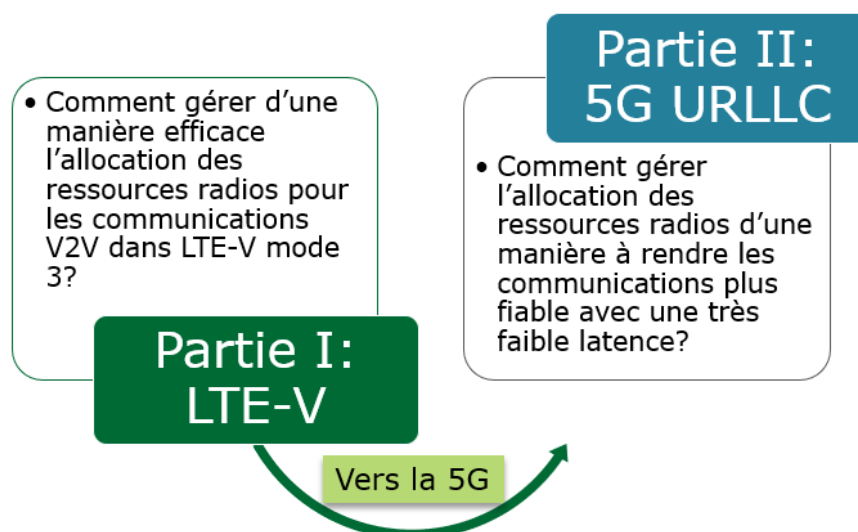


FIGURE 1.1 – Problématique de la thèse.

situations de trafic dense.

- PEARL-RM : un nouveau système de gestion des ressources radio pour le mode 3 du LTE-V qui vise à répondre aux exigences des applications de sécurité. D'une part, notre algorithme en deux étapes garantit la priorité et la capacité nécessaire pour assurer les exigences des applications critiques et, d'autre part, introduit la technique de réutilisation des ressources en cas de manque de ressources pour augmenter la fiabilité des applications critiques et non critiques.
- Modélisation 5G : Le développement du modèle mathématique pour la gestion des ressources radios dans le contexte de la 5G et le calcul des paramètres de performance comme le taux de perte et le délai.

### 1.3 Organisation du manuscrit

Ma thèse intitulée "Gestion intelligente des ressources radios dans un environnement véhiculaire hétérogène de la 4G vers la 5G" s'intéresse à la sécurité routière et permet de garantir les ressources radios nécessaires aux communications V2V tout en assurant les exigences et les contraintes des réseaux véhiculaires. Cette thèse est organisée comme suit :

Le chapitre 1 présente le contexte général de la thèse.

Le chapitre 2 définit l'état de l'art de l'allocation des ressources radios dans LTE-V ainsi que l'architecture fonctionnelle de l'allocation des ressources radios dans 5G-URLLC. Les chapitre 3 et 4 présentent nos propositions pour LTE-V mode 3

de la 1 ère partie de la thèse.

Les chapitres 5 et 6 sont dédiés à la 2 ème partie de la thèse 5G-URLLC. Ils s'intéressent au développement du modèle 5G-URLLC pour l'allocation des ressources radios V2X.

Le chapitre 7 conclut le manuscrit en résumant les contributions et en mettant l'accent sur les perspectives de notre travail.

## 1.4 Publications

- M. Allouch, S. Kallel, A. Soua, O. Shagdar, and S. Tohme, "Survey on radio resource allocation in long-term evolution-vehicle," *Concurrency and Computation : Practice and Experience*, Feb. 2021.
- M. Allouch, S. Kallel, A. Soua and S. Tohme, "PEARL : A Novel Priority and Guaranteed-based Resource Allocation Approach for V2V Communications in LTE-V Mode 3," *2020 8th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*, 2020, pp. 1-6.
- M. Allouch, S. Khemiri-Kallel, A. Soua and S. Tohme, "A Priority and Guarantee-based Resource Allocation with Reuse Mechanism in LTE-V Mode 3," *2021 Wireless Days (WD)*, 2021, pp. 1-5.

# Chapitre 2

## Etat de l'art

### 2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la partie état de l'art de la thèse. Le sujet de la première partie de la thèse porte sur la technologie LTE-V. Elle présente une technologie prometteuse pour les communications V2X. La transition de LTE-V vers les réseaux 5G V2X s'avère bien adapté aux réseaux véhiculaires. Dans ce contexte, nous nous intéressons par la suite à l'état de l'art de la deuxième partie de la thèse concernant les communications ultra-fiables et à faible latence dans 5G (5G-UURLLC). Ces communications constituent une nouvelle catégorie de services dans la 5G pour répondre aux services et applications ayant des exigences strictes en matière de latence et de fiabilité.

### 2.2 LTE-V : Architecture et allocation des ressources radios

Nous présentons en premier lieu l'architecture LTE-V et en deuxième lieu nous nous intéressons au sujet de l'allocation des ressources radios dans LTE-V. Pour ce faire, nous décrivons les différentes approches d'allocation des ressources dans les réseaux véhiculaires en présentant la nouvelle taxonomie adoptée.

#### 2.2.1 Architecture LTE-V

Avant d'entamer la partie étude bibliographique pour l'allocation des ressources radios dans LTE-V, nous présentons l'architecture LTE-V, ses modes de communications et sa nouvelle couche physique.

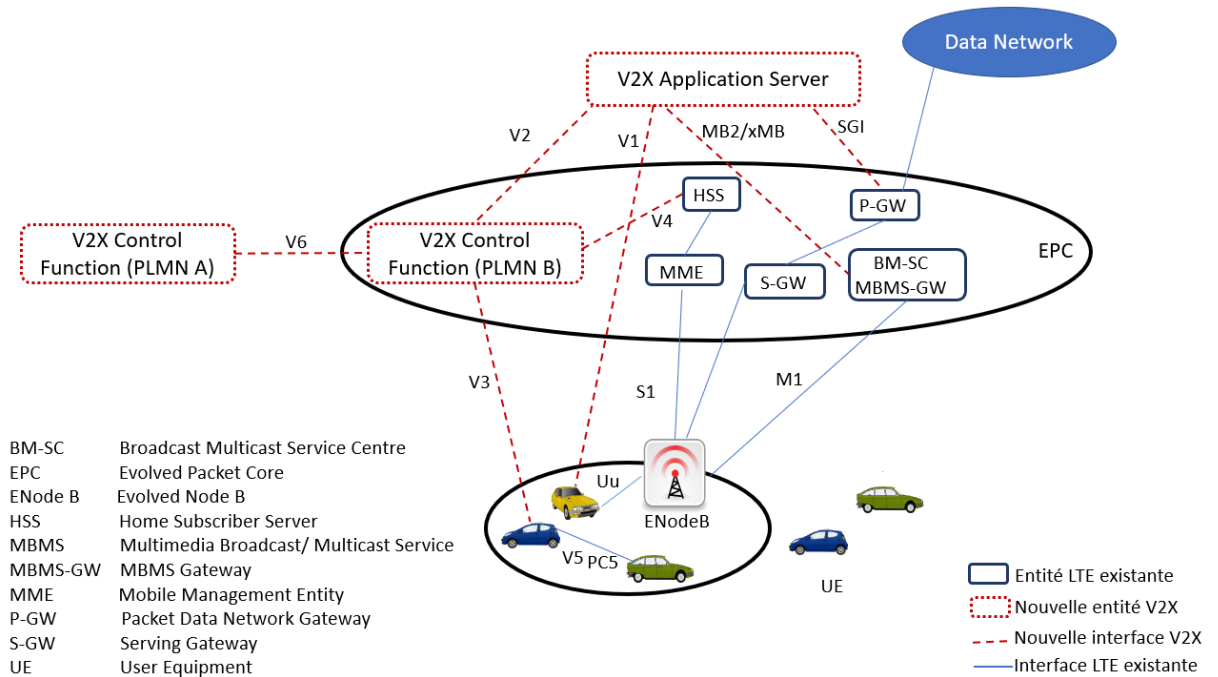


FIGURE 2.1 – Architecture LTE-V.

### Architecture fonctionnelle de LTE-V

L'architecture LTE-V ajoute de nouvelles entités par rapport à l'architecture LTE traditionnelle, comme l'illustre la figure 2.1. Les deux entités clés introduites dans LTE-V sont la fonction de contrôle V2X et le serveur d'applications V2X [6], [7], [8].

**Fonction de contrôle V2X** est une entité logique utilisée pour fournir aux véhicules (VUE) les paramètres nécessaires pour la communication V2X. Elle permet aussi parmi d'autres fonctions de fournir aux VUE des paramètres de configuration nécessaires lorsqu'il n'est pas desservi par le réseau.

**V2X Application Server** est la deuxième entité importante dans le système de communication V2X. Ce serveur assure le traitement des données des communications V2X et reçoit les données des liaisons montantes des VUE par la transmission monodiffusion. De plus, le serveur d'applications V2X communique avec la fonction de contrôle V2X pour assurer d'autres services V2X.

### Modes de communications

Il existe deux modes de fonctionnement pour la communication V2X [9] :

1. Interface de communication V2X via PC5 : L'interface PC5 connecte di-

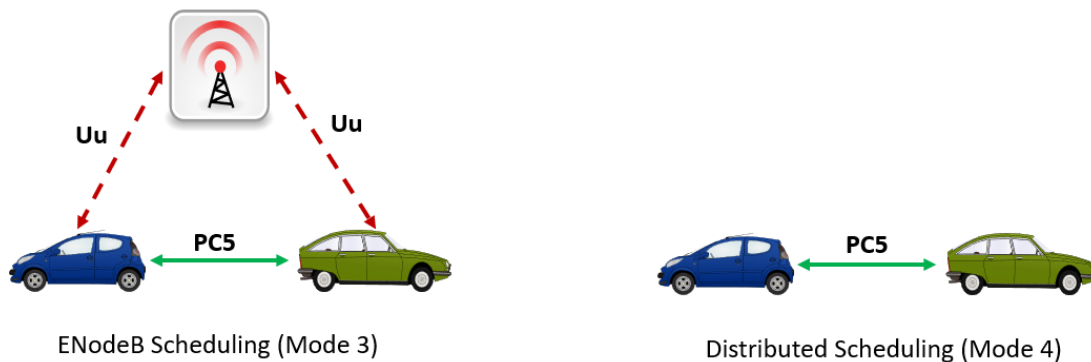


FIGURE 2.2 – Communication modes in LTE-V

rectement les VUE ou les UE de sorte que le message V2X émis d'un UE est directement reçu par les VUE autour de lui (liaison Sidelink). Elle est assurée lorsque le VUE est sous ou hors la couverture réseau.

2. Communication V2X via l'interface LTE-Uu : L'interface LTE-Uu connecte les UE avec l'eNodeB (ou E-UTRAN) qui joue le rôle de station de base dans les réseaux LTE. Elle n'est prise en charge que lorsque le VUE est à l'intérieur de la couverture réseau.

### Couche physique

LTE-V utilise un accès multiple par répartition en fréquence à porteuse unique (SC-FDMA single-carrier frequency-division multiple access) et une structure de trame TDD (Time Division Duplexing). LTE-V prend en charge des canaux à 10 et 20 MHz. Chaque canal est divisé en sous-trames, *blocs de ressources (RBs)* et sous-canaux. Les sous-trames ont une longueur de 1 ms comme l'illustre la figure 2.3. Un RB est la plus petite unité de ressources de fréquence pouvant être allouée à un utilisateur. Sa fréquence est de 180 kHz (12 sous-porteuses de 15 kHz). LTE-V définit les sous-canaux comme un groupe de RB dans la même sous-trame, et le nombre de RB par sous-canal peut varier. Les sous-canaux sont utilisés pour transmettre des données et contrôler les informations. Les données sont transmises dans des *Blocs de Transport (TBs)* sur des canaux appelés *Physical Sidelink Shared Channels (PSSCH)*, et les messages d'*Information de Contrôle Sidelink (SCI)* sont transmis sur des canaux appelés *Physical Sidelink Control Channels (PSCCH)* [10]. Un TB contient un paquet complet à transmettre, par exemple un message *Cooperative Awareness Message (CAM)* [11]. Un noeud qui veut transmettre un TB doit également transmettre sa SCI associée, également appelée aussi Scheduling



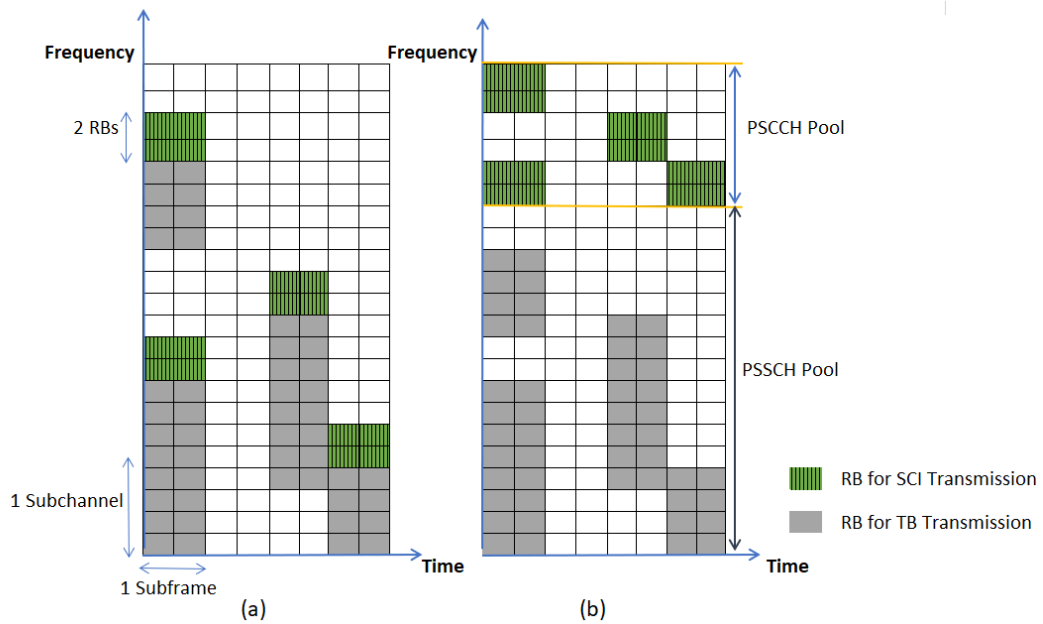


FIGURE 2.3 – Types de subcanalisation.

Assignment. Le SCI comprend des informations telles que le *schéma de modulation et de codage (MCS)* utilisé pour transmettre le TB et les RBs qu'il utilise.

LTE-V définit deux schémas de subcanalisation pour la transmission de TB et de SCI comme l'indique la figure 2.3 :

- PSCCH+PSSCH adjacents : SCI (2 RBs) et TB sont transmis dans des RBs adjacents.
- PSCCH+PSSCH non adjacents : les RBs sont divisés en groupes (pools). Un pool pour transmettre que des TBs et un autre pour transmettre que des SCIs (2 RBs).

La sous-trame V2V pour l'interface PC5 est composée de 14 symboles par sous trame et parmi ces symboles, 4 symboles Demodulation Reference Signals (DMRS) ajoutés pour gérer l'effet Doppler élevé associé à des vitesses relatives allant jusqu'à 500 km / h et à haute fréquence (la bande ITS à 5,9 GHz étant la cible principale). Une fois la couche PHY décrite et connaissant le format de la plus petite entité allouée à un véhicule nous allons nous intéresser à comment allouer cette ressource. Pour ce faire , nous avons mené une étude bibliographique décrite dans ce qui suit.

### 2.2.2 Allocation des ressources dans la LTE-V

Dans cette section, nous fournissons une taxonomie pour les algorithmes d'allocation des ressources pour les modes 3 et 4 dans LTE-V. Dans la littérature, plusieurs études se sont concentrées sur l'allocation des ressources dans le contexte du LTE mais très peu d'entre elles s'intéressent à la fois à l'allocation des ressources et aux réseaux véhiculaires basés sur la technologie LTE-V. L'étude faite dans [12] ne met en évidence que les cas d'utilisation dans les réseaux véhiculaires et les différents types de communication utilisés. Les auteurs n'étudient pas les propositions d'allocation de ressources et ne fournissent aucune classification.

Dans [13], l'étude des approches aborde la question de l'allocation des ressources dans un contexte véhiculaire. Elle classe les propositions existantes en trois catégories en fonction des technologies de communication utilisées, à savoir les réseaux véhiculaires DSRC (Dedicated Short Range Communications), les réseaux véhiculaires cellulaires et les réseaux véhiculaires hétérogènes.

L'étude présentée dans [14] est la seule qui se concentre sur les mécanismes d'allocation des ressources dans LTE-V, mais seules les propositions dédiées au mode 3 ont été incluses.

Par conséquent, une étude est nécessaire pour détailler toutes ces propositions et proposer une taxonomie complète pour les modes 3 et 4. C'est l'objectif de notre étude qui traite globalement le problème de l'allocation des ressources selon différents critères. Les classifications des propositions peuvent être fournies sur la base de plusieurs critères comme décrit ci-dessus. Dans notre taxonomie, trois catégories principales sont identifiées : Les approches basées sur la détection, sur l'interférence et enfin sur la qualité de service. Toutefois, certaines intersections sont identifiées entre les catégories mentionnées, ce qui donne deux groupes supplémentaires, à savoir L'approche basée sur la détection et l'interférence, et l'approche basée sur l'interférence et la qualité de service. Cette taxonomie adoptée est illustrée dans la figure 2.4.

#### Allocation des ressources basée sur la détection

La détection est une approche largement utilisée dans les technologies de communication sans fil, telles que le Wi-Fi, et elle est utilisée dans de nombreux schémas d'allocation de ressources pour le mode 4 du C-V2X. L'objectif principal de la détection est de minimiser les collisions entre les dispositifs présents dans le réseau.

Une proposition de référence dans les approches basées sur la détection est le schéma proposé par la norme 3GPP dans la version 14 [10],[15] appelé schéma semi-persistent-scheduling (SPS) basé sur la détection. Le SPS utilise la détection pour déterminer l'ensemble des sous-trames et des sous-canaux à transmettre en fonction de la taille du message. La figure 2.5 décrit cet algorithme.

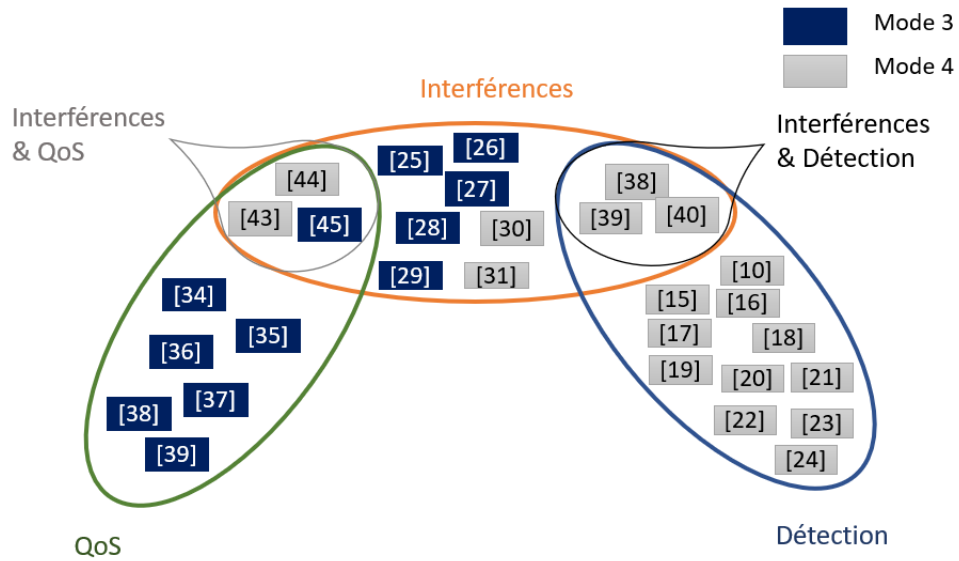


FIGURE 2.4 – Taxonomie pour l'allocation des ressources pour la LTE-V

SPS détermine la ou les ressources qu'un utilisateur (UE) peut choisir en fonction de la détection de la ressource utilisée par les UE dans un passé récent. L'objectif de cette technique est d'allouer les ressources adéquates pour un nombre de transmissions de re-sélection consécutives qui est multiple de la période SPS.

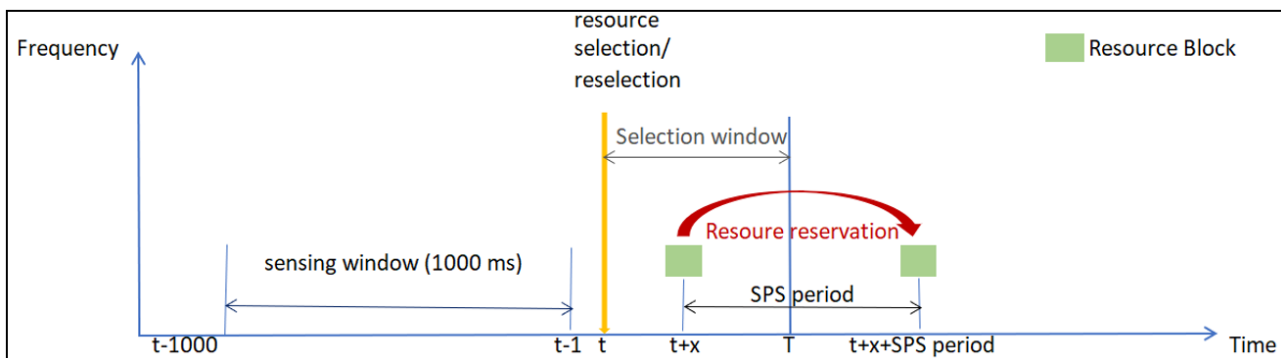


FIGURE 2.5 – Fenêtres de détection et de sélection pour SPS

Comme il est important de comprendre comment les algorithmes d'allocation des ressources fonctionnent dans la norme, le schéma de fonctionnement du SPS est illustré dans la figure 2.6, et détaillé dans ce qui suit :

- Pour sélectionner de nouveaux sous-canaux au moment  $t$ , le véhicule  $V$  peut

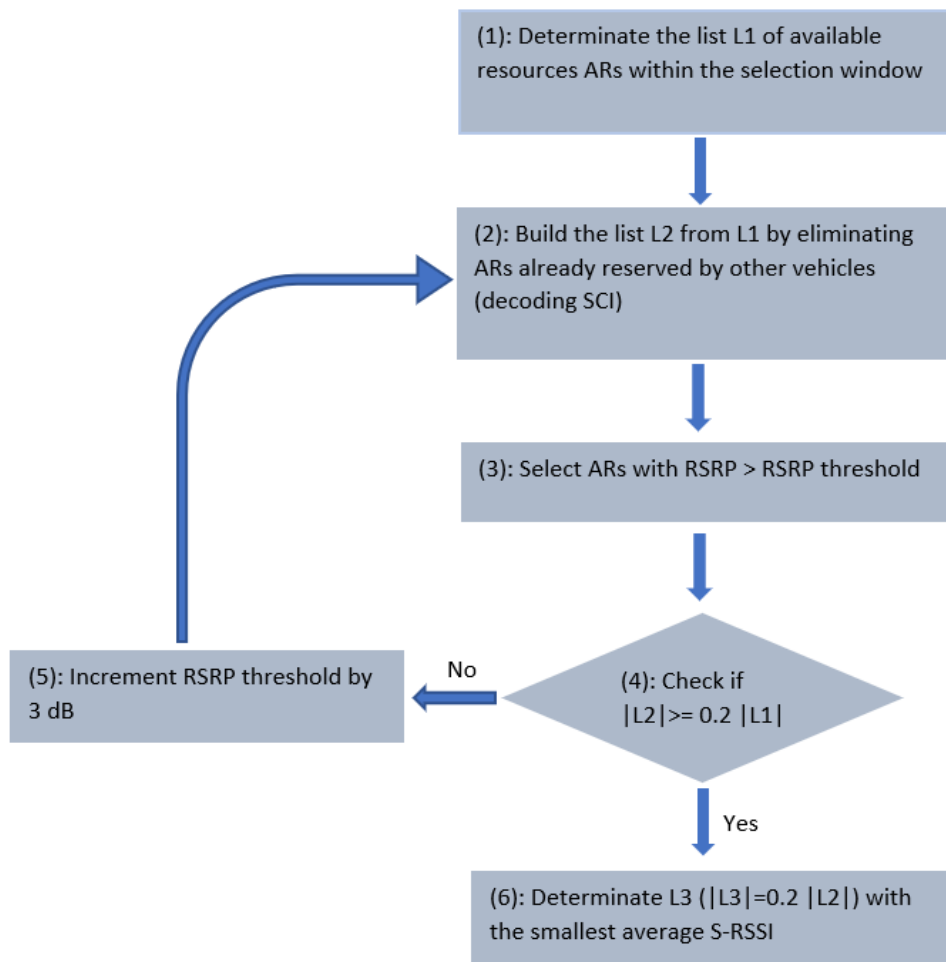


FIGURE 2.6 – Procédure SPS

commencer sa réservation de sous-canaux dans la fenêtre de sélection (entre  $t$  et la latence maximale établie  $T$ ).  $V$  détermine une première liste ( $L1$ ) comprenant les ressources disponibles ( $ARs$ ) pouvant être réservées (1).

- $V$  analyse l'ensemble des informations qu'il a reçues dans le passé (1000 sous-trames avant  $t$ ). Une deuxième liste de  $ARs$  désignés par ( $L2$ ) est créée, comprenant ceux qui ne sont pas réservés par d'autres véhicules (2) et ceux présentant une puissance moyenne reçue du signal de référence (RSRP) inférieure à un seuil donné (3). Le nouveau nombre de  $ARs$  en  $L2$  peut être égal ou supérieur à 20 % de tous les  $ARs$  en  $L1$  (4). Dans le cas contraire, (2) et (3) sont exécutés de manière itérative jusqu'à ce que l'objectif minimum de 20 % soit atteint. Ce seuil est incrémenté de 3 dB à chaque itération(5).
- L'élément  $V$  crée une troisième liste ( $L3$ ) de  $ARs$ . Il inclut 20 % de  $ARs$  dans  $L2$  qui présente l'indicateur de force moyenne du signal reçu (RSSI) le plus bas sur tous ses RB (6). Pour chaque véhicule  $V$ , un des  $ARs$  est choisi au hasard parmi les  $L3$  et il est réservé pour les prochaines transmissions de paquets du compteur de ressources.
- Ce compteur, qui est le nombre de paquets à transmettre, est défini aléatoirement pour différentes valeurs en fonction de l'intervalle de réservation des ressources.
- Après la transmission d'un paquet, ce compteur Counter est décrémenté de un. Lorsqu'il atteint zéro, il est nécessaire de sélectionner à nouveau de nouvelles ressources avec une probabilité de  $(1 - P)$ . Lorsque la chance de conserver les ressources précédentes est la même, la probabilité  $P$  est comprise entre 0 et 0,8.
- Une quatrième liste ( $L4$ ) peut être créée pour la transmission redondante. Si la transmission originale a été établie dans un AR dans la sous-trame  $SF1$ ,  $L4$  inclut tous les  $ARs$  dans la fenêtre de sélection qui sont identifiés dans l'intervalle de temps  $[SF - 15ms; SF + 15ms]$ , à l'exception de tous les candidats ressources dans  $SF1$ . Ainsi, pour la transmission redondante, le  $AR$  est choisi parmi les ressources de  $L4$ .

Plusieurs articles [16] [17], [18] [19] se sont concentrés sur l'étude des performances des SPS dans différents scénarios. Par exemple, les auteurs de [18] ont présenté une évaluation des SPS en termes de variation du taux de livraison des paquets (PDR) en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Cette évaluation a également abordé l'impact de différents types d'erreurs de transmission sur le PDR.

R. Molina-Masegosa et J. Gozalvez dans [20] évaluent également les performances de l'algorithme SPS et proposent une modification de la norme appelée SPS modifié. Ce schéma résout le problème de l'inefficacité des réservations lorsque nous

## 2.2. LTE-V : ARCHITECTURE ET ALLOCATION DES RESSOURCES RADIOS23

TABLE 2.1 – Allocation de ressources basée sur la détection pour le mode 4

Ref.	Approche	Inputs	Métriques	bande de fréquence	Type de message	Issues
[10], [15], [17], [16], [18], [19]	Schéma standard et évaluation basée sur le niveau d'interférence; allocation périodique → réduire la charge du signal Algo : détection RB sélectionne le RB en fonction du RSRP et du RSSI	–RSRP –RSSI	–PDR[17] –Pourcentage d'erreur de transmission[16] –PDR, la probabilité de chaque type d'erreur lorsqu'elle se produit [18] –Packet error rate(PER), inter packet gap(IPG) [19]	5,9 GHz	CAM (avec un intervalle fixe de 100ms)	–Probabilité de collision non négligeable dans les scénarios à haute densité
[20]	Amélioration du standard SPS : Pas de réservation pour les paquets de grande taille afin de maximiser l'utilisation des ressources.	–RSRP –RSSI	–Utilisation des sous-canaux –Pourcentage de collisions	5,9 GHz	CAM (300 octets avec différents intervalles de 20, 50 et 100ms)	–Non adapté au trafic sporadique avec des paquets de taille variable
[21]	L'amélioration du SPS standard par le STS-RS : un schéma basé sur la détection à court terme pour réduire les collisions de paquets dues à la congestion.	–RSRP –RSSI	–PDR	5,9 GHz	messages périodiques et aperiodiques	– Seul le scénario d'autoroute est pris en compte (le cas du scénario urbain n'est pas pris en compte )
[22]	Amélioration de CA par les retransmissions de SA et le piggybacking de SA dans les paquets de données	–Informations sur la couche d'application	–PDR	5,9 GHz	CAM	–Surcharge du signal (entête) potentiellement élevé au prix d'une réduction des collisions de paquets
[23], [24]	OOO : réservation locale pour l'OOO basée sur la génération de mots de code binaire par période. STDMA : modèle de réservation de créneaux horaires mis à jour périodiquement sur la base de la détection et de la réutilisation spatiale des ressources	–Position du véhicule –vitesse du véhicule – charge du canal offerte	–PDR	5.7 and 5.9 GHz	CAM (avec un intervalle fixe de 100ms)	–OOO : le code de génération est rendu local –STDMA : inefficace pour les environnements à changement rapide.

devons réserver des sous-canaux pour des paquets de tailles différentes au cours de la même période de réservation SPS avant que le compteur n'atteigne zéro. Ainsi, les auteurs proposent de supprimer la réservation de sous-canaux pour la transmission de paquets les plus grands. Le schéma SPS basé sur la détection n'est utilisé que pour sélectionner les sous-canaux nécessaires à la transmission de ces paquets. Ces sous-canaux ne seront pas gardés réservés pour les transmissions suivantes du compteur de re-sélection. Les résultats ont montré l'amélioration réalisée par l'algorithme en terme de PDR en fonction de la distance émetteur-récepteur (Tx-Rx) avec une utilisation plus efficace des sous-canaux. Par rapport au schéma standard, l'amélioration proposée du SPS entraîne moins de collisions de paquets. Cependant, elle n'est pas adaptée au trafic sporadique avec des paquets de taille variable. Dans ce cas, le calibrage de la période de réservation du SPS aura un impact sur les performances de l'algorithme. Toutefois, le système standard subit davantage de collisions de paquets car les véhicules se font concurrence pour un plus petit nombre de sous-canaux. De plus, les auteurs de [21] fournissent une amélioration de l'algorithme SPS. Ils proposent un schéma basé sur la détection à court terme pour les réseaux C-V2X (STS-RS). Ce dernier vient minimiser le taux de collision entre les transmissions dues à la contestation de la sélection des ressources, en particulier pour les transmissions aperiodiques, afin d'améliorer la fiabilité. Le schéma STS-RS diffère du SPS par la configuration d'une durée de détection à court terme au début de l'unité de ressource juste avant la sélection de la ressource. Sur la base de cette courte durée de détection et du résultat de la détection, le paquet est transmis dans la ressource sélectionnée. Les résultats montrent que le système STS-RS augmente la fiabilité des transmissions en réduisant considérablement les collisions de paquets par rapport au système SPS. Cependant, la mise en œuvre du STS-RS est limitée au scénario "autoroute".

Dans [22], les auteurs présentent une amélioration de l'algorithme de base d'évitement des collisions (CA). Pour la procédure CA, afin de transmettre des paquets de données après la réservation des ressources, des schedule assignments (SA) sont nécessaires. Le problème est que ces dernières sont transmises de manière aléatoire sans réservation de ressources. Par conséquent, ils peuvent entrer en collision. Lorsque les SA entrent en collision, les véhicules peuvent sélectionner les mêmes ressources que celles réservées par les SA en collision (puisque'ils n'ont pas connaissance de la réservation de ressources effectuée par les SA en collision). Cela peut entraîner une collision consécutive de paquets de données. Pour résoudre ce problème, les auteurs proposent d'utiliser des paquets de données pour diffuser la réservation des ressources de données et des ressources SA, ce qui peut permettre une meilleure communication entre les véhicules voisins sur la réservation des ressources et réduire les collisions de données. En effet, cette proposition permet l'ordonnancement des SA avant l'ordonnancement des transmissions de données

et l'ordonnancement des paquets de données est faite après la dernière retransmission SA prévue. Par conséquent, il est nécessaire de maintenir pour chaque véhicule deux tableaux pour l'SA et la réservation des ressources de données. Ensuite, les informations relatives à la réservation des ressources de données sont envoyées avec les paquets SA. Ce faisant, la solution réduit la collision de données mais nécessite un surcoût potentiellement élevé. Dans [23] et [24], L. Gallo et J. Harri décrivent deux mécanismes d'ordonnancement distribué : la première approche est une technique basée sur la retransmission appelée code orthogonal (OOC). Dans la deuxième approche, ils introduisent la technique d'accès multiple par répartition dans le temps (STDMA), un système basé sur les réservations conçu pour les applications de compte rendu de position. Ces deux approches sont présentées comme des solutions pour assurer une communication LTE-V2X fiable. Pour le premier mécanisme, les OOC sont des ensembles de mots de code binaires que les UE peuvent générer et utiliser localement pour réguler l'accès aux canaux. Les mots de code OOC sont composés de uns (1) pour le mode de transmission et de zéros (0) pour le mode de réception. Les UE génèrent un mot de code par période, puis associent chaque bit, dans l'ordre, aux créneaux disponibles. Par conséquent, deux UE peuvent entrer en collision au maximum avec le nombre de uns dans le mode de transmission, ce qui améliore la fiabilité de la transmission. Pour le second mécanisme, le STDMA, est un protocole dans lequel les UE exploitent les connaissances des transmissions CAM des autres UE, et donc aussi leurs positions, pour réserver des créneaux pour leurs transmissions. Les UE écoutent une trame STDMA complète. Sur cette base, les UE obtiendront une représentation des créneaux (RBs) disponibles et occupés. Ensuite, les UE choisissent de manière autonome suffisamment de créneaux horaires pour transmettre. Dans le cas où il n'y aurait pas assez de créneaux libres sont disponibles, les UE utiliseront les créneaux occupés par les UE les plus éloignées géographiquement et annonceront les créneaux qui leur sont réservés. La réservation des créneaux horaires est maintenue périodiquement pendant un certain nombre de périodes (choisies au hasard). L'OOC et le STDMA donnent de meilleurs résultats dans différents scénarios : D'une part, la STDMA donne de meilleurs résultats dans des environnements à évolution lente en raison du schéma de pré-réservation de la STDMA. D'autre part, l'OOC présente une meilleure performance en termes de PDR pour les topologies à évolution rapide due aux retransmissions et aux corrélations croisées limitées, qui influencent la fiabilité de la livraison. En ce qui concerne la faiblesse de ces propositions, les codes OOC sont générés localement et le STDMA atteint ses limites en cas d'évolution rapide de l'environnement.

Le tableau 2.1 ci-dessus décrit présente une comparaison entre les algorithmes d'allocation des ressources basés sur la détection pour le mode 4. Ce tableau met particulièrement l'accent sur l'approche adoptée, la mesure de performance ciblée



et les issues qui en découlent.

### Allocation de ressources basée sur les interférences

Les interférences sont considérées comme un obstacle majeur à la réalisation de l'objectif principal, à savoir une communication fiable sur les réseaux sans fil. Les techniques d'atténuation des interférences peuvent être réalisées dans le contexte du temps, de la fréquence et de l'espace. Par exemple, les interférences peuvent être évitées en tenant compte de l'emplacement et de la position des véhicules. Ainsi, plusieurs travaux dans la littérature ont proposé des méthodes d'allocation des ressources dans LTE-V en tenant compte de la position du véhicule. Ces algorithmes sont également proposés pour les deux modes d'allocation des ressources dans la LTE-V. Dans ce qui suit, ces travaux seront illustrés, en commençant par le mode 3, puis en présentant des propositions pour le mode 4. Les auteurs de [25] ont proposé un schéma d'allocation dynamique des ressources basé sur le flux de trafic pour attribuer des ressources radio aux liaisons de communication V2V. Dans cette proposition, les communications V2V partagent la même bande de fréquence sous licence avec les communications cellulaires typiques dans une cellule LTE. L'idée clé de la proposition des auteurs est de regrouper les liaisons V2V en fonction de leur type d'application (sécurité ou divertissement) et de leur comportement de déplacement (vitesse des véhicules). Après le regroupement V2V, la station de base attribue des ressources radio aux liaisons V2V de chaque groupe selon une méthode de sélection proposée. Cette dernière est basée sur le calcul d'une valeur d'utilité de la capacité de communication pour chaque ressource radio et la sélection de celle présentant la valeur maximale. Les simulations montrent de meilleurs résultats par rapport à l'approche greedy et à l'algorithme d'allocation aléatoire en termes de temps de fonctionnement de la simulation et d'aspects d'efficacité spectrale. Cependant, elle montre des performances plus faibles par rapport à l'algorithme greedy en termes de valeur d'utilité de la capacité et du nombre de liaisons V2V admises avec succès dans le système. Parmi les faiblesses de cette proposition, il faut noter que le mécanisme de regroupement n'est pas adapté à un réseau à très haute dynamique comme le réseau de véhicules ad hoc (VANET). En outre, il n'y a pas de mécanisme explicite de priorisation entre les messages et la priorité est donnée en premier lieu aux utilisateurs cellulaires.

## 2.2. LTE-V : ARCHITECTURE ET ALLOCATION DES RESSOURCES RADIOS27

TABLE 2.2 – Allocation des ressources basée sur les interférences pour le mode 3

Réf.	Approche	Inputs	Métriques	bande de fréquence	Type de message	Issues
[25]	Basée sur le type de trafic et du niveau d'interférences	–SINR –Temps de service	–Temps d'exécution –Efficacité spectrale –Valeur de l'utilité de capacité –Nombre de liaisons V2V admis avec succès dans le système	Bande Underlay D2D	Non spécifié	–Le mécanisme de regroupement n'est pas adapté à un réseau de véhicules très dynamique –Pas de priorisation explicite entre les messages –La priorité est donnée en premier lieu aux utilisateurs cellulaires
[26]	Basée sur l'aspect de la réutilisation des ressources et l'allocation spatiale du spectre	–Position du véhicule –partition des zones	–Efficacité de l'utilisation des ressources –Taux d'erreur des paquets	Bande Overlay D2D	CAM (300 octets /paquet de données avec un intervalle fixe de 100ms)	–L'allocation des ressources est abandonnée lorsqu'il n'y a pas assez de RB –Les utilisateurs sont traités selon la procédure FIFO –La partition des zones est très idéale (très difficile dans la réalité) –. L'ordonnanceur global n'est pas réaliste –Aucune spécification sur le délai de communication entre le véhicule et l'ordonnanceur global –Il dépend de la précision du GPS
[27]	Basée sur la distance de réutilisation en tenant compte de la précision de la position	–Awreness range –Min SINR –Puissance Trx par RB –Gain de l'antenne à la réception	–Précision de la localisation - Taux de blocage moyen - Taux de blocage moyen - Taux d'erreur moyen -Ratio de réception des paquets	Bande Underlay D2D	CAM (190 et 300 octets avec un intervalle fixe de 100ms)	–Aucune prise en compte des autres messages ITS (comme le DENM) –Aucune priorisation –L'allocation de ressources est abandonnée lorsqu'il n'y a pas assez de RBs

[28]	Le concept de distance de réutilisation est utilisé pour ne pas bloquer les transmissions	<ul style="list-style-type: none"> <li>–Awreness range</li> <li>–Min SINR,</li> <li>–Puissance de transmission par RB</li> <li>–Gain de l'antenne à la réception</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>–PRR</li> <li>–UD</li> </ul>	5.9 GHz	CAM (300 octets avec un intervalle fixe de 100 ms)	<ul style="list-style-type: none"> <li>–Aucune prise en compte des autres messages ITS (comme le DENM)</li> <li>–Aucune priorisation</li> </ul>
[29]	Partitionnement du graphe : regroupement des liaisons V2V fortement interférentes pour maximiser la capacité totale V2I tout en garantissant la fiabilité des liaisons V2V	<ul style="list-style-type: none"> <li>–SINR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>–La capacité totale V2I capacity</li> <li>–SINR</li> </ul>	2 GHz	Non spécifié	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Nécessité d'un compte-rendu périodique des informations sur le fading</li> <li>– Absence de prise en compte de la priorisation des messages</li> </ul>

Dans une deuxième proposition [26], les auteurs ont adopté le mode D2D overlay selon lequel les ressources D2D sont orthogonales aux ressources des utilisateurs cellulaires. Ils ont proposé deux algorithmes d'allocation de ressources D2D basés sur la localisation pour le service de radiodiffusion V2V, appelés algorithme de planification centralisée basée sur la localisation (LB-CSA) et algorithme de planification distribuée basée sur la localisation (LB-DSA), où ils ont adopté respectivement une approche d'allocation de ressources centralisée et distribuée. Un mécanisme de distance de réutilisation est appliqué pour les deux approches, permettant d'éviter les interférences co-fréquences et garantissant que pas plus d'un utilisateur n'envoie des informations à un moment donné dans une plage de diffusion. LB-CSA est très exigeant en termes de capacité des systèmes centralisés de et il ne peut pas couvrir tous les utilisateurs de D2D tout le temps. C'est pourquoi le LB-DSA est proposé, dans lequel plusieurs stations de base sur différents sites pourraient être utilisées pour allouer les ressources au lieu d'une seule station de base centralisée. Le LB-CSA est légèrement plus performant en termes de délai, de précision de transmission et de réutilisation des ressources. En effet, le LB-DSA allège la charge de l'ordonnancer central et a une demande moindre sur

les installations de communication. Le principal avantage des deux approches est la réalisation de la réutilisation spatiale des ressources tout en contrôlant le taux d'erreur des paquets à un niveau acceptable. Néanmoins, ces deux propositions n'ont pas apporté de solutions lorsqu'il n'y a plus de RB disponibles dans la distance de réutilisation. De plus, elles sont basées sur un système de partitionnement des zones très précis qui n'est pas toujours évident pour les réseaux dynamiques de véhicules. De plus, l'ordonnancer global n'est pas réaliste et le mécanisme d'allocation dépend beaucoup de la précision du système de positionnement global (GPS).

Dans la [27], une approche similaire basée sur la distance minimale de réutilisation est proposée par les auteurs dans la [26]. La principale différence par rapport aux travaux précédents réside dans le calcul de cette métrique qui est calculée en fonction de awareness range requise, du rapport signal/brouillage plus bruit (SINR), de la puissance du bruit, etc. plutôt que de la distance euclidienne habituelle. L'algorithme d'allocation des ressources proposé a été vérifié par des simulations. Les résultats ont montré que les performances de l'approche proposée sont très dépendants de la précision de la localisation. Un autre point est que cette proposition ne garantit pas les ressources pour les transmissions lorsqu'il n'y a pas assez de RBs. En outre, d'autres messages STI tels que les messages DENM n'ont pas été pris en compte.

Une autre contribution importante concernant l'allocation des ressources en mode 3 est présentée par Giammarco Cecchini et al. [28]. Même s'ils utilisent également une approche de réutilisation des ressources, leur proposition est différente puisqu'ils se concentrent sur la problématique des transmissions bloquées lorsque l'utilisation des ressources est élevée. Leur algorithme appelé distance maximale de réutilisation (MRD) vise à sélectionner la ressource réutilisée présentant une distance maximale entre les nœuds impliqués. La sélection de la ressource potentielle se fait à la fois dans le domaine temporel et dans le domaine des fréquences, en veillant toujours à ce que la ressource du nœud le plus éloigné soit sélectionnée. Les résultats ont montré que [28] offre un taux de réception de paquets élevé et un Update Delay (UP) constamment faible. En outre, les auteurs ont simulé certaines inexactitudes de localisation (UTDOA, système mondial de navigation par satellite (GNSS)) au niveau des eNodeB et a démontré qu'elles n'entraînent aucune dégradation des performances du DRM. Néanmoins, les messages STI ayant la plus haute priorité de transmission n'ont pas été pris en compte dans cet algorithme. Les auteurs de [29] étudient le problème de l'allocation des ressources dans les communications véhiculaires basées sur le D2D en proposant un algorithme basé sur les graphes. Cette proposition utilise un outil de partitionnement des graphes pour diviser les liaisons V2V à fortes interférences en différents groupes. Ensuite, le problème de partage du spectre est formulé comme un problème de correspon-

dance tridimensionnelle pondérée qui est ensuite résolu en adaptant un algorithme d'approximation très performant. Cette solution dépend des informations précises sur l'état du canal. C'est pourquoi l'une des limites de cet algorithme est la nécessité d'un rapport périodique des informations sur le signal. De plus, l'algorithme n'implémente aucune priorisation des messages.

Les propositions susmentionnées [26], [27], [28], [29] partagent l'objectif commun de réduire les interférences en utilisant la position des véhicules et la technique de réutilisation pour allouer les ressources. D'autre part, ils partagent également un point faible commun qui ne réside dans aucun considérant l'existence d'autres types de messages STI comme le DENM et ils n'envisagent donc aucune hiérarchisation entre les messages.

Le tableau 2.2 compare les propositions d'allocation des ressources basées sur l'interférence présentées ci-dessus en utilisant différents critères tels que les paramètres d'entrée, les différentes mesures utilisées pour la procédure d'allocation des ressources, et aussi les limites de chaque proposition.

Les recherches ont également porté sur les approches fondées sur la localisation dans le mode 4. À ce titre, deux propositions principales sont citées : [30] et [31]. Alors que le premier est basé sur la diffusion d'une carte d'occupation RB par chaque nœud concerné en fonction des messages reçues pour indiquer la disponibilité des ressources, le second attribue les ressources aux véhicules en fonction de leur comportement de déplacement (vitesse, position, cap, etc) et un ensemble spécial de sous-ressources est sélectionné pour chaque situation de trafic. L'évaluation des performances de [30] a montré que l'utilisation de la procédure de resélection des ressources basée sur une carte en couleur (MAP-RP) par rapport aux algorithmes de détection de [32] et [33] peut apporter jusqu'à 20% d'amélioration du taux de réception des paquets, dans les faibles valeurs de la portée de communication. Cependant, il est moins performant dans les scénarios de haute densité et ne fournit qu'une vue locale des voisins. De plus, la sélection du sous-groupe de ressources est basée sur le cap du véhicule (nord-sud, ouest-est), ce qui peut ne pas fonctionner pour certains tracés de route tels que les ronds-points. D'autre part, les résultats de [31] ont montré que l'algorithme proposé est plus performant en termes de rapport de réception des paquets (PRR) par rapport à la répartition aléatoire dans les deux cas (urbain et autoroute). L'un des points faibles de cette proposition est l'impact significatif du comportement dynamique de l'environnement sur le temps d'exécution. De plus, l'évaluation des performances de cette proposition est simple puisque les auteurs ne font que faire la comparaison avec un schéma aléatoire. Ci-après, le tableau 2.3 compare les différents algorithmes en mode 4 pour la catégorie d'interférence et de localisation en termes d'approche, de métriques et de problèmes proposés.

TABLE 2.3 – Allocation de ressources basée sur les interférences pour mode 4

Ref.	Approche	Inputs	Métriques	bande de fréquence	Type de message	Issues
[30]	Alloue les ressources en temps et en fréquences en fonction de la vitesse, de la densité, de la direction et de la position des véhicules pour deux types de zones (autoroute et intersection) afin de minimiser les interférences	–Position du véhicule	–PRR	6 GHz	Non spécifié	–Comparé uniquement à un algorithme aléatoire –Impact du temps d'exécution sur le changement d'environnement
[31]	Construction de la carte d'état de chaque RB pour chaque nœud : libre, occupé, illisible. Suivant ces hypothèses, chaque véhicule reçoit des messages avec des cartes de RBs de ses voisins → construit sa propre connaissance de l'occupation des ressources	–Map (état de chaque ressource radio du point de vue du récepteur)	–PDR –UD	5.9 GHz	CAM(100ms)	–Moins de performance avec une densité élevée –Vue locale des voisins (selon awarness range)...

## Allocation de ressources basée sur la QoS

La QoS est l'un des principaux objectifs qui vise à garantir les meilleures performances du réseau, comme une capacité minimale du système, un délai minimal, une grande fiabilité, etc. Afin de satisfaire ces exigences, elle permet par exemple différents mécanismes comme la réservation des ressources, la différenciation des services, etc. Dans cette section, nous nous concentrerons sur les aspects de la qualité de service des différentes propositions. Dans le mode 3, les auteurs de [34] considèrent d'abord quatre types d'exigences d'allocation qui doivent être garanties : Une exigence de QoS définie en termes de capacité du canal requis par un véhicule pour transmettre son signal et trois conditions de conflit qui tiennent compte de la fiabilité de la réception.

Ils formulent tout d'abord le système étudié comme un problème d'optimisation afin de maximiser la capacité totale du système tout en garantissant les 4 conditions décrites ci-dessus. Ensuite, ils proposent une approche sous-optimale en trois étapes qui est présentée sous la forme de problèmes de sac à dos indépendants multiples (MIKP) pour l'allocation des ressources V2V. La proposition de MIKPs est une méthode simplifiée en trois étapes. Au cours de la première étape, les groupes sont triés en fonction de leur cardinalité, du plus élevé au le plus bas. Ainsi, les groupes ayant un nombre plus élevé de véhicules seront traités en premier, car il est plus compliqué de les optimiser. La deuxième étape consiste à faire correspondre les véhicules et les sous-trames de manière aléatoire, sans aucun critère d'attribution de sous-trames spécifiques aux véhicules. La seule règle à respecter est que tous les véhicules appartenant au même groupe doivent être placés dans des sous-trames différentes. La troisième étape, MIKP est proposée pour maximiser l'utilisation des sous-canaux et trouver quels sous-canaux répondent aux exigences de qualité de service de chaque véhicule.

En comparant l'approche proposée basée sur les MIKPs à l'approche optimale définie par la formulation, les résultats ont montré que la solution sous-optimale atteint des performances acceptables. Cependant, la proposition ne tient pas compte des autres messages STI (pas de priorité entre les messages) et ne prend pas en compte la spécificité des véhicules comme les différentes densités ou la mobilité.

De plus, nous soulignons la proposition du mode 3 dans [35] qui a un scénario de communication où les véhicules peuvent communiquer entre eux (V2V) et avec l'infrastructure (V2I). Les auteurs envisagent une optimisation du problème ayant pour objectif de maximiser le débit des V2I-UEs tout en garantissant l'exigence de fiabilité V2V-UEs. Pour ce faire, une technique d'ordonnancement en deux phases a été proposée, dans laquelle un ordonnanceur Time Domain (TD) trie d'abord les différents V-UE en fonction de leurs exigences de qualité de service, puis sélectionne un nombre limité de V-UE à ordonner en fonction des paramètres de délai, de débit et de taille de la mémoire tampon. Dans la deuxième phase, un ordonnanceur

du domaine fréquentiel (FD) attribue des RB à chaque classe V2I-UE et V2V-UE, qui ont déjà été sélectionnées par l'ordonnanceur du domaine temporel. Au cours de cette deuxième étape, l'ordonnanceur FD commence par allouer des ressources aux communications V2I, puis sélectionne les RBs parmi les RBs déjà alloués pour les partager avec V2V-UEs uniquement s'ils ne perturbent pas les communications V2I-UEs. L'un des inconvénients de cette proposition est de ne prendre en compte qu'un seul type de trafic par communication V2V et V2I. Ils n'ont pas envisagé de différenciation de la qualité de service entre les types de messages STI (ex. DENM, CAM). Une autre proposition clé pour le mode 3 est réalisée dans [36] où les communications véhiculaires et cellulaires partagent les mêmes ressources radio. L'approche classe les utilisateurs en trois classes : la classe C-UE à débit binaire garanti (GBR), la classe C-UE sans GBR (NGBR) et la classe V-UE. Ensuite, les utilisateurs de chaque classe sont classés par ordre de priorité en fonction de leurs exigences de qualité de service dans l'ordonnanceur de TD. Par la suite, des ressources sont allouées pour les C-UE (les utilisateurs cellulaires) puis pour les V-UE dans l'ordonnanceur FD. En plus de ne pas tenir compte de la différenciation du service de QoS entre les communications V2V, les auteurs ne donnent la priorité qu'aux utilisateurs cellulaires, par conséquent les V-UE pourraient ne pas avoir assez de ressources. En raison du partage des ressources entre les C-UE et les V-UE, l'interférence est réduite mais ne pourrait pas être totalement éliminée.

Une amélioration de cette approche est étudiée dans [37], où les auteurs classent les V-UE dans des catégories de safety et de non-safety, en donnant la priorité à la première classe. Bien que la priorité soit accordée aux messages safety, les communications cellulaires continuent de monopoliser la capacité, car la priorité est toujours donnée aux utilisateurs cellulaires et les utilisateurs véhiculaires sont pris en compte en deuxième position.

Une autre proposition dans [38] étudie le problème de l'allocation des ressources du spectre radioélectrique et du contrôle de la puissance dans un réseau de communication V2V en mode 3. Les auteurs utilisent le mappage de fonctions pour convertir l'allocation de RBs entre les liaisons V2V en un problème d'inférence de croyance basé sur le modèle de graphe factoriel. Ils proposent l'algorithme Belief Propagation based on Real-time Update of Messages (BPRUM) pour résoudre ce problème d'inférence et maximiser le nombre de liens V2V alloués au même RB. Les résultats des simulations montrent une augmentation significative de l'utilisation du spectre et du débit du réseau de communication V2V en considérant l'exigence de qualité de service (QoS) des liaisons V2V. L'article [39] considère un réseau cellulaire basé sur LTE-V2X facilitant les communications V2I et V2V. Les auteurs de cet article proposent des algorithmes mode 3 pour l'allocation des ressources V2I et V2V pour le scénario de la diffusion de messages de sécurité à haute priorité avec un service de téléchargement vidéo à faible priorité fonctionnant en



arrière-plan. Ils présentent un algorithme d'allocation de ressources V2I pour la transmission de messages de sécurité (à l'aide d'un ordonnancement round-robin) avec une priorité strictement supérieure à celle du trafic de base (à l'aide d'un ordonnancement proportionnel équitable (FP)). Ils proposent également un algorithme d'allocation de ressources V2V pour la diffusion de messages de sécurité sur la liaison V2V. L'objectif des algorithmes proposés est de réduire le délai et d'augmenter la fiabilité de la diffusion des messages safety tout en minimisant la dégradation du débit du service vidéo.

Le tableau 2.4 fournit un résumé de l'algorithme proposé pour l'allocation des ressources basée sur la qualité de service.

### **Allocation de ressources basée sur une approche hybride**

Outre les différentes propositions susmentionnées, d'autres techniques ont adopté une approche hybride pour sélectionner les ressources appropriées pour les communications V2V. La plupart d'entre elles sont basées sur une technique basée sur l'interférence qu'elles combinent avec d'autres approches telles que la qualité de service ou la détection. Dans ce qui suit, nous présentons les propositions les plus pertinentes dans chacune de ces deux catégories.

#### *Attribution des ressources basée sur les interférences et la détection*

Trois contributions principales [40] [41] [42] sont soulignées dans la suite. Le premier ouvrage de [40] est composé de deux phases. Alors que la première consiste à partitionner le pool de ressources en fonction des directions de déplacement des véhicules, la seconde phase a appliqué un schéma d'évitement de l'allocation des ressources basé sur la détection qui détermine la liste des véhicules interférents et construit ensuite une carte d'utilisation des ressources basée sur l'occupation des ressources. L'un des principaux inconvénients de cette proposition est que la sélection du sous-groupe de ressources est basée sur la direction du véhicule (nord-sud et est-ouest), ce qui pourrait ne pas fonctionner pour certains tracés routiers tels que les ronds-points.

La deuxième contribution illustrée dans [41] est basée sur la division de la région géographique en petites zones séparées et ensuite sur la cartographie de chaque zone en un ensemble de blocs de ressources. Ensuite, les auteurs présentent deux variantes d'algorithme de sélection des ressources géospatiales amélioré (EGRSA) et d'algorithme de sélection des ressources géospatiales dynamique (DGRSA) pour s'attaquer au problème de l'interférence aux frontières. La première approche propose de randomiser le choix de la sous-trame de chaque ressource alors que dans la seconde les relations cartographiques sont modifiées de manière dynamique en se basant sur la densité maximale de véhicules dans chaque zone en utilisant le

TABLE 2.4 – Allocation de ressources basée sur la QoS dans le mode 3

Réf.	Approche	Inputs	Métriques	bande de fréquence	Type de message	Issues
[34]	Problème de sac à dos : évite les conflits de sélection des ressources et garantit la QoS (la capacité requise par un véhicule)	–SINR –Capacité de transmission de chaque groupe	–Débit réalisable	Non spécifié	Message périodique	–Pas de prise en compte des autres messages ITS (comme DENM) –Pas de priorisation –La spécificité des véhicules (densités différentes, mobilité) n'est pas prise en compte
[35]	Maximiser le taux de sum rate des utilisateurs V2I tout en garantissant l'exigence de fiabilité des utilisateurs V2V	–SINR	–PDR –Sum rate du réseau – Délai moyen de mise en file d'attente	2 GHz	Messages V2I et V2V	–Pas de prise en compte d'autres messages ITS (comme DENM) – Pas de priorisation
[36]	Maximiser le débit total pour les utilisateurs cellulaires, tout en garantissant les exigences de fiabilité et de latence pour les utilisateurs de véhicules	–SINR	–PDR –Débit du système –Délai moyen de mise en file d'attente	2 GHz	–GBR/ NGBR pour les transmissions V-UE –cellulaires	–Pas de prise en compte des autres messages ITS (comme DENM) –Pas de priorisation des communications entre véhicules. Les communications cellulaires pourraient monopoliser l'utilisation de la capacité du système. Des interférences sont toujours possibles entre les communications cellulaires et celles des véhicules
[37]	Garantir la faible latence et les exigences de fiabilité strictes des V-UE de sécurité, maximiser la capacité du débit total sous les contraintes de retard des C-UE et des V-UE non safety	–SINR	–PDR –Débit système	–Délai moyen de mise en file d'attente	2 GHz	–Safety/ Non-safety for V-UEs – Transmissions cellulaires – Aucune priorisation des communications avec les véhicules, la priorité est toujours donnée aux cellulaires –Des interférences cellulaires et entre véhicules sont toujours possibles

même ensemble de ressources. Les résultats de la simulation corroborent la capacité des deux variantes à améliorer le PRR et à réduire les collisions aux limites. Cependant, pour l'EGRSA, la cartographie entre la zone et le sous-groupe est non seulement statique mais elle n'est pas non plus clairement expliquée.

Pour la DGRSA, l'inconvénient est l'inefficacité de l'utilisation de la densité maximale pour ajuster la taille de chaque groupe de ressources car elle peut provoquer un gaspillage de ressources. La troisième proposition dans [42] appelée "geo-based Scheduling for C-V2X Networks", prend en compte la localisation des véhicules à proximité et leur ordre sur la route pour sélectionner les sous-canaux. Ainsi, il s'attaque au fameux problème de terminal caché afin de réduire les collisions. Par rapport au système SPS, le système géostationnaire réduit les collisions de paquets et augmente considérablement les performances du C-V2X en termes de fiabilité. Cependant, l'algorithme basé sur la géographie ne prend en compte qu'un seul type de messages ITS (périodiques) et aucune différenciation de service n'est donc appliquée.

Le tableau 2.5 ci-dessous résume ces propositions et présente leurs enjeux potentiels.

#### *Interference and QoS based resource allocation*

Ci-après, la deuxième catégorie d'approches hybrides est présentée. Ces propositions, qui sont résumées dans le tableau 2.6, combinent à la fois l'interférence et la qualité de service dans l'algorithme d'allocation des ressources. Ainsi, dans [43], une allocation des ressources en fonction de la proximité et de la charge pour les communications V2V est proposée. L'approche proposée exploite les schémas de trafic spatio-temporels, en termes de charge et de proximité physique des véhicules, pour minimiser le coût total du réseau. Ce dernier tient compte des compromis entre la charge (c'est-à-dire le retard de service) et les transmissions réussies tout en satisfaisant aux exigences de qualité de service des véhicules. Pour résoudre le problème de l'optimisation sous un canal à variation lente d'information, elle a découplé le problème en deux sous-problèmes. Tout d'abord, un mécanisme de regroupement dynamique est proposé pour regrouper les véhicules dans des zones en fonction de leurs habitudes de circulation et des informations de proximité. Ensuite, un jeu de correspondance est effectué afin d'allouer des ressources pour chaque paire V2V dans chaque zone. Pour le résoudre, un algorithme distribué est proposé afin d'affecter les paires V2V à l'ensemble des RB pour obtenir une correspondance stable. Les résultats ont montré que le système proposé donne un pourcentage plus élevé de paires V2V satisfaisant la qualité de service ainsi qu'un gain significatif en termes de SINR par rapport à une base de référence d'allocation des ressources de pointe. L'inconvénient de cette solution est que la précision de la localisation des véhicules peut affecter la performance de l'algorithme d'allocation

TABLE 2.5 – Comparaison des algorithmes d'allocation de ressources basés sur les interférences et la détection en mode 4

Ref.	Approche	Inputs	Métriques	bande de fréquence	Type de message	Issues
[40]	Partitionnement des ressources en fonction de la direction du VUE, avec un mécanisme de CA basé sur la détection qui vise à atténuer les interférences potentielles entre les VUEs	–Direction du véhicule –Position du véhicule	–PRR	6 GHz	CAM	– La sélection du sous-groupe de ressources est basée sur la direction du véhicule (nord-sud, ouest-est), ce qui peut ne pas fonctionner pour certains types de routes comme les ronds-points
[41]	Basée sur le mappage de chaque zone en un bloc de ressources ou en un sous-pool de ressources pour le mappage et le schéma de détection pour la sélection des ressources	–Position du véhicule	–PRR	6 GHz	CAM	–EGRSA : le mappage entre la zone et le sous-pool est statique et n'est pas expliqué –DGRSA : la densité maximale pour ajuster la taille de chaque sous-pool de ressources n'est pas efficace (perte de ressources)
[42]	Sélection des ressources radio en fonction de l'emplacement et de l'ordre des véhicules voisins sur la route dans le but de réduire les collisions de paquets	–Position du véhicule	–PDR	5,9 GHz	CAM	–Pas de prise en compte d'autres messages ITS (comme DENM)

des ressources. En particulier dans le cas de la circulation routière dynamique, où le véhicule peut se déplacer rapidement d'une zone à l'autre. Dans ce cas, il n'est pas réaliste de considérer la localisation moyenne des véhicules comme étant la réalité. En outre, l'algorithme nécessite une étape de formation de groupes. Cela entraîne des frais généraux supplémentaires.

Les auteurs dans [44] présentent une nouvelle approche dédiée à une zone hors couverture qui est délimitée par l'infrastructure du réseau. En collectant et en prédisant des informations telles que la vitesse des véhicules, la densité et le trafic des messages, l'infrastructure du réseau assure la fiabilité des services V2V en tenant compte de la différenciation de services. Deux classes de services V2V sont envisagées : la classe DENMs et CAMs.

Les DENM ne sont pas préprogrammés puisqu'il s'agit de messages aperiodiques et que les ressources nécessaires sont réservées à ce type de services. En revanche, pour les CAM qui sont des messages périodiques, les ressources sont préprogrammées. Sur la base de ces observations, les auteurs analysent la réservation des ressources en fonction de la fiabilité des cibles, en fonction de la densité des véhicules et de la taille des zones non couvertes. Ensuite, la quantité de ressources nécessaires pour atteindre une fiabilité cible donnée pour les DENM est déterminée. Après la réservation des ressources pour les DENM, les ressources disponibles restantes sont préprogrammées et utilisées pour les CAM. L'originalité de cet algorithme réside dans la prise en compte du scénario hors couverture et la prévision de l'ordonnement des ressources. Les résultats indiquent que l'augmentation de la fiabilité requise ne pénalise pas le système de manière prohibitive. En revanche, les erreurs de prédiction de vitesse diminuent considérablement le taux de réussite de la transmission, d'où la nécessité d'ajuster l'ordonneur et d'avoir une conception plus souple. Dans ce travail, la collecte et la prédiction d'informations telles que la vitesse des véhicules, la densité et le trafic des messages ne sont pas calculées mais données. En outre, le scénario doit être amélioré en tenant compte non seulement des communications unicast, mais aussi des transmissions de radiodiffusion et de multidiffusion et d'un trafic routier réaliste avec des conditions d'environnement radio dynamiques.

Les auteurs dans [45] proposent une allocation des ressources radio en mode underlay. Ce schéma vise à maximiser le débit en liaison descendante tout en garantissant les exigences de latence et de fiabilité des communications V2V. Pour ce faire, les auteurs utilisent la théorie d'optimisation de Lyapunov, pour trouver la solution optimale au problème considéré. Les résultats démontrent que leur proposition peut réduire de manière significative l'interférence des communications V2V aux CUE et assurer les exigences de latence et de fiabilité des communications V2V. La faiblesse de ce travail est de ne pas prendre en compte un autre type de messages STI comme le DENM, qui nécessite des contraintes de Qos spécifiques.

TABLE 2.6 – Résumé des algorithmes d'allocation de ressources basés sur les interférences et la QoS

Réf.	Approche	Inputs	Métriques	Bande de Fréquence	Type du message	Issues
[43]	Exploitation de la charge et de la localisation des véhicules pour satisfaire les exigences de QoS des véhicules (mode 4)	–Position du véhicule –SINR	–Pourcentage de V-UEs satisfaisant le SINR cible –Nombre d'itérations de correspondance de swap par zone	800 MHz	Message périodique (1600 octets)	–La précision de l'emplacement des véhicules peut affecter l'algorithme d'allocation des ressources –Surcharge par rapport à la formation de groupes et à la formation de zones dynamiques
[44]	Deux méthodes d'allocation des ressources : pour les messages pré-programmés et adhoc dans le cas d'une zone hors couverture (DOCA) basée sur la prédiction de vitesse (mode 4)	–Taux d'arrivée des véhicules (position et vitesse) –Longueur de la DOCA	–Taux d'admission –Reliabilité –Délai	5,9 GHz	CAM, DENM	–Seulement des messages unicast (pas de transmissions broadcast/multicast) –Pas de modification des conditions de propagation –Les prédictions ne sont pas calculées (proposées)
[45]	Maximiser le débit de données total en liaison descendante des CUE tout en garantissant à la fois les exigences de délai et de fiabilité des VUE (mode 3)	–SINR	–Sum data rate –Délai	2 GHz	Non spécifié	–Pas de prise en compte de la différenciation de service pour les messages ITS (ex. entre CAM et DENM)

### 2.2.3 Problématique

#### Discussion

Les sections précédentes ont présenté un aperçu complet de la norme LTE-V2X pour les communications sidelink ou V2V basées sur l'interface PC5. L'article comprenait également une analyse détaillée de l'état de l'art concernant les propositions d'allocation de ressources pour les modes 3 et 4 au cours des dernières années. Cette étude a permis de souligner que le LTE-V peut représenter une alternative au 802.11p pour permettre les communications V2X. De plus, l'étude a offert une image globale des différents avantages et inconvénients de chaque proposition d'allocation de ressources pour le LTE-V. Cette étude a mis en évidence la capacité du mode 3 du LTE-V à gérer les interférences (par exemple, en atténuant les interférences intercellulaires) grâce à son architecture centralisée et à la capacité de l'eNodeB à faciliter toutes les allocations de ressources. Toutefois, ces propositions d'allocation dépendent en permanence de la présence de l'infrastructure, ce qui n'est évidemment pas toujours le cas dans un environnement véhiculaire. En outre, une technique centralisée comme le mode 3 entraîne une complexité accrue dans le cas de grands réseaux comme les VANET et entrave alors gravement l'efficacité de toute technique proposée. D'autre part, les techniques d'allocation de ressources distribuées, qui sont basées sur le mode 4, sont plus à même de réduire la complexité des dispositifs et de diminuer les interférences avec les réseaux cellulaires. Elles nécessitent en contrepartie une synchronisation parfaite entre les différents utilisateurs et un système de positionnement précis puisque la plupart d'entre elles sont basées sur un schéma de clustering. En outre, la programmation distribuée, qui n'est pas exempte de collisions, exige une configuration minutieuse des paramètres de transmission, en particulier pour les applications autonomes qui nécessitent des véhicules pour émettre plus fréquemment, et des mécanismes de contrôle de la congestion sont alors également nécessaires.

En fait, les mécanismes d'attribution du mode 4 sont imbriqués avec la gestion des interférences de manière compliquée. D'une part, le déploiement ultra dense raccourcit les distances entre les véhicules interférents, ce qui se traduit par des interférences plus nombreuses et plus fortes. D'autre part, le multiplexage des ressources permet d'augmenter les possibilités d'accès, L'allocation des ressources est couplée à une gestion des interférences multi-domaines effectuée simultanément dans les domaines de la fréquence, du temps et de l'espace. Ainsi, une modélisation minutieuse des interférences, le contrôle des interférences, doit être étudiée afin de réaliser un compromis entre la diminution des interférences et l'augmentation de l'utilité des ressources.

De plus, les deux modes sont capables de gérer un mécanisme de réutilisation des ressources qui assure une utilisation maximale des ressources. Cependant, cette

technique nécessite également un système de localisation précis ainsi que des calculs et des frais généraux supplémentaires pour la déclaration des valeurs SINR. En fait, les réseaux statiques sont presque supposés dans la plupart des ouvrages, et donc la mobilité du réseau est ignorée. Même lorsqu'un réseau mobile est étudié, le modèle de précision de localisation n'est pas présenté. Des études expérimentales ont montré qu'un GPS de véhicule peut introduire plusieurs mètres d'erreurs lors de l'annonce de sa localisation. Les approches traitant du cloisonnement des zones de véhicules auront du mal à localiser les véhicules et il existe alors un risque potentiel que l'allocation des ressources radio devienne inefficace.

L'une des principales faiblesses des propositions présentées dans la section 2.2.2 est leur incapacité à gérer la priorisation du trafic. C'est très difficile lorsqu'il s'agit d'applications automobiles autonomes qui nécessitent des paramètres de qualité de service et des mécanismes de priorisation différents. Dans ce contexte, la diversité des applications véhiculaires et la diversité des exigences de service associées en termes de débit de données, de latence, de fiabilité, conduisent à la nécessité pour les réseaux de fournir un ensemble diversifié d'outils de priorisation et de paramètres de QoS lors de l'allocation des ressources radio aux nœuds impliqués. En observant les travaux connexes déjà étudiés dans la section précédente, on voit clairement que la plupart des propositions ont étudié un scénario dans lequel il n'y a qu'une seule classe de messages et ne prévoient aucune différenciation de service pour les messages STI.

## Enjeux

L'allocation des ressources est un facteur fondamental lors de la conception d'un système de communication basé sur le LTE-V. Bien que ce thème ait été largement étudié, il reste encore beaucoup à faire menée dans ce domaine, en particulier pour le cas distribué (mode 4), que nous considérons plus réaliste lorsque nous considérons la nature intrinsèquement distribuée des réseaux de véhicules.

Dans la discussion qui suit, nous mettons en évidence un certain nombre de problèmes de recherche ouverts qui sont passés inaperçus dans la littérature et qui nécessitent un examen plus approfondi à l'avenir.

- Scenarios Multi-Operator : Avec l'augmentation du taux de pénétration des voitures prises en charge par le C-V2X et l'infrastructure cellulaire déjà déployée, le mode 3 du V2V devrait être déployé en premier, en particulier pour des cas d'utilisation spécifiques (par exemple, le convoi de véhicules). Dans ce contexte, le schéma de fonctionnement du mode 3 nécessite évidemment un certain niveau de coordination entre les opérateurs de réseaux mobiles (MNOs). Ainsi, nous voyons que les MNO, dans ce cas, doivent partager les pools de ressources sur la bande de fréquences, par exemple 5,9 GHz. Dans ce cas, les opérateurs cellulaires peuvent partager les infrastruc-



tures de réseau, ce qui accélère le déploiement du réseau et permet d'offrir des services à moindre coût.

- Mécanismes de contrôle de la congestion pour le mode 4 : La norme LTE-V2X ne spécifie pas de technique particulière de contrôle décentralisé de la congestion (DCC) pour le LTE-V2X. En fait, dans certains scénarios denses, des centaines de stations ITS peuvent se trouver dans une petite zone géographique, donc partager les ressources radio entre elles devient très difficile. C'est pourquoi il est nécessaire de recourir à la technique DCC pour coordonner l'utilisation du canal. Toutes les stations doivent se coordonner pour maintenir le canal non saturé, et les ressources sont partagées de manière égale. Un mécanisme DCC non bien étudiée peut avoir un impact important sur les performances de l'allocation des ressources comme démontré dans [46]. En fait, un mécanisme DCC peut généralement utiliser une ou plusieurs techniques comme la retransmission par paquets, la transmission par paquets, l'adaptation du MCS, l'adaptation de la puissance de transmission.
- Softwarization : Le paradigme Software-Defined Networking (SDN) a déjà été exploité pour les réseaux de véhicules. Il permet une gestion dynamique des ressources en découplant le plan de contrôle des données. Ces caractéristiques clés permettent au SDN d'être un acteur majeur dans l'allocation des ressources en mode LTE-V 3 et 4. Certaines architectures de véhicules basées sur le SDN ont déjà été proposées dans la littérature [47] [48] [49]. Dans [47], les auteurs proposent une architecture SDN à plusieurs niveaux qui peut s'adapter aussi bien au mode 3 qu'au mode 4. Dans ce cas, le contrôleur SDN est en mesure d'acquérir une connaissance globale des réseaux et des ressources radio disponibles, puis de générer des politiques/règles pour la procédure d'allocation des ressources sur la base des informations collectées. Chaque fois qu'un nouveau flux entre dans le réseau cellulaire avec des exigences de qualité de service différentes, le contrôleur SDN a la possibilité d'adapter l'algorithme d'allocation.
- Testbeds expérimentales : Pour évaluer efficacement les performances de toute technique d'allocation de ressources radio dans les réseaux LTE-V, il est très important de tester ces approches sur un environnement réaliste. Ce faisant, les chercheurs peuvent facilement évaluer leur caractère pratique et mettre en évidence les véritables problèmes de mise en œuvre qui nécessitent un examen plus approfondi. Ainsi, la conception des testbeds pour l'allocation des ressources radio peut fournir un outil permettant aux chercheurs d'approuver expérimentalement leurs résultats analytiques et leurs approches dans un environnement réel.

## 2.3 5G-V2X :Architecture et gestion des ressources radios pour les communications 5G-URLLC

Dans la section précédente, nous avons décrit la technologie LTE-V. La transition technologique de LTE-V vers la 5G est très importante surtout pour répondre au mieux aux exigences des réseaux véhiculaires. Pour prendre en charge les URLLC, il faut apporter des changements à la fois évolutifs et révolutionnaires à l'interface radio, appelée 5G new radio (NR). Ainsi, l'architecture 5G doit donc être améliorée afin de répondre à ces exigences très strictes de V2X. Le network slicing est présenté comme une solution de premier plan pour y répondre. Dans cette section, nous présentons d'abord l'architecture 5G-V2X et la nouvelle radio pour la 5G, ensuite nous nous intéressons au slicing et en particulier l'implication du slicing pour les communications V2X.

### 2.3.1 Architecture et Nouvelle Radio de la 5G

#### Architecture 5G-V2X

Dans la release 17 [50], le 3GPP définit d'autres améliorations à l'architecture V2X. La figure 2.7 montre l'architecture 5G-V2X. Parmi les principales fonctions et points de référence prenant en charge les communications V2X :

**Serveur d'application V2X** : le serveur d'application V2X (V2X AS) comprend la fonctionnalité AF (Application Function). Parmi les fonctionnalités qu'il prend en charge pour le traitement des services V2X par la réception des données de liaison montante de l'UE en monodiffusion, l'envoi de données en liaison descendante à l'UE par monodiffusion et la fourniture au 5GC (réseau coeur) des paramètres pour les communications V2X sur les points de référence PC5 et Uu.

**-Policy Control Function PCF** : Il peut déterminer la politique/le paramètre V2X spécifique à fournir à l'UE sur la base de la capacité PC5 de l'UE reçue pour V2X. Parmi d'autres fonctions, il détermine s'il faut fournir à l'UE une politique/des paramètres V2X pour la communication V2X sur le point de référence PC5 et/ou la communication V2X sur le point de référence Uu.

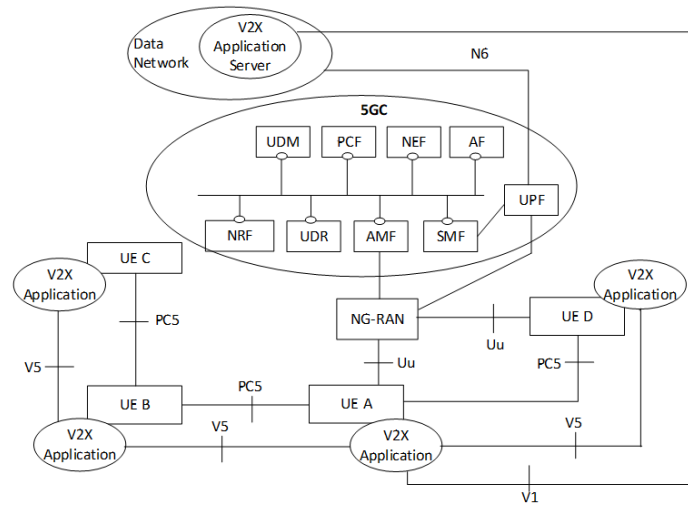


FIGURE 2.7 – Architecture 5G-V2X [50]

### Services de la 5G

La demande de la quantité importante de trafic de voix et de données sur les réseaux de télécommunications de nos jours est toujours en croissance, et les exigences des applications sont de plus en plus strictes. C'est dans ce contexte que la 5G propose des solutions adéquates pour cette forte demande et aux strictes exigences des applications. En effet, le bon fonctionnement de la 5G repose sur trois principaux services [51] (figure 2.8) :

- eMBB (enhanced Mobile Broadband) : Ce service permet aux utilisateurs d'accéder à des contenus gourmands en débit. Il assure aux usagers finaux de télécharger un film en très haute qualité en seulement quelques secondes.
- mMTC (massive Machine-Type Communications) : Ce service offre de son côté la possibilité d'avoir une densité d'objets en 5G plus importante. Ainsi, on pourrait installer 1 million d'appareils sur un mètre carré sans problèmes (Internet of Things plus solide et fiable).
- URLLC (Ultra Reliable & Low Latency Communications) : L'URLLC est un service qui permet comme son nom l'indique de réduire la latence de bout en bout et augmenter la robustesse des abonnées de transmission. Il joue un rôle très important pour la sécurité du véhicule autonome.

On s'intéresse dans cette deuxième partie de la thèse au service URLLC. Les objectifs de ce service comme décrit ci-dessous satisfont les exigences des applications temps réels critiques dans les réseaux véhiculaires comme le contrôle à distance des véhicules autonomes.

Une nouvelle couche radio a été proposée dans la release 15 [52] pour assurer les communications URLLC. C'est la couche Nouvelle Radio (NR).

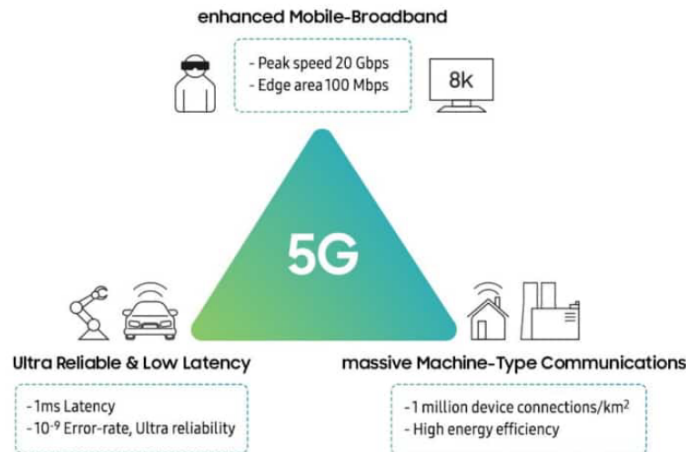


FIGURE 2.8 – Les services de la 5G [51]

### La couche nouvelle radio (NR)

Contrairement aux systèmes 4G LTE, les exigences en latence, en fiabilité, et en débit doivent être conjointement considérées dans la 5G NR ; par conséquent, il devrait y avoir un changement fondamental dans l'architecture de la couche physique à savoir : format des paquets, des slots et de la trame. Plus précisément, il est nécessaire d'avoir une structure de paquets sensible à la latence pour un processus de décodage rapide ainsi qu'une structure de trame flexible pour soutenir le changement dynamique des ressources sur l'exigence de latence, surtout lorsque le service URLLC [53] [54] est lancé, le paquet URLLC doit être transmis instantanément sans retard.

**structure de la trame NR** : Dans le contexte des normes cellulaires, la « numérologie » fait référence à la durée de symbole et à l'espacement de sous-porteuses de la couche physique [55]. Le 3GPP a établi une numérologie flexible qui ajuste l'espacement entre les sous-porteuses orthogonales et commence par l'espacement de 15 kHz de la technologie LTE. L'une des principales raisons pour lesquelles il était judicieux d'exploiter le travail exhaustif déjà réalisé pour la numérologie LTE résidait dans la capacité des déploiements NR à coexister et à être temporellement alignés avec les réseaux LTE pendant les premières phases du déploiement. Ainsi, les utilisateurs LTE peuvent adopter de manière progressive la nouvelle technologie. La numérologie NR procède à un ajustement selon la formule suivante (figure 2.9).

$$SCS = 15 \cdot 2^\mu \text{kHz}, \mu \in \{0, 1, 2, 3, 4\} \quad (2.1)$$

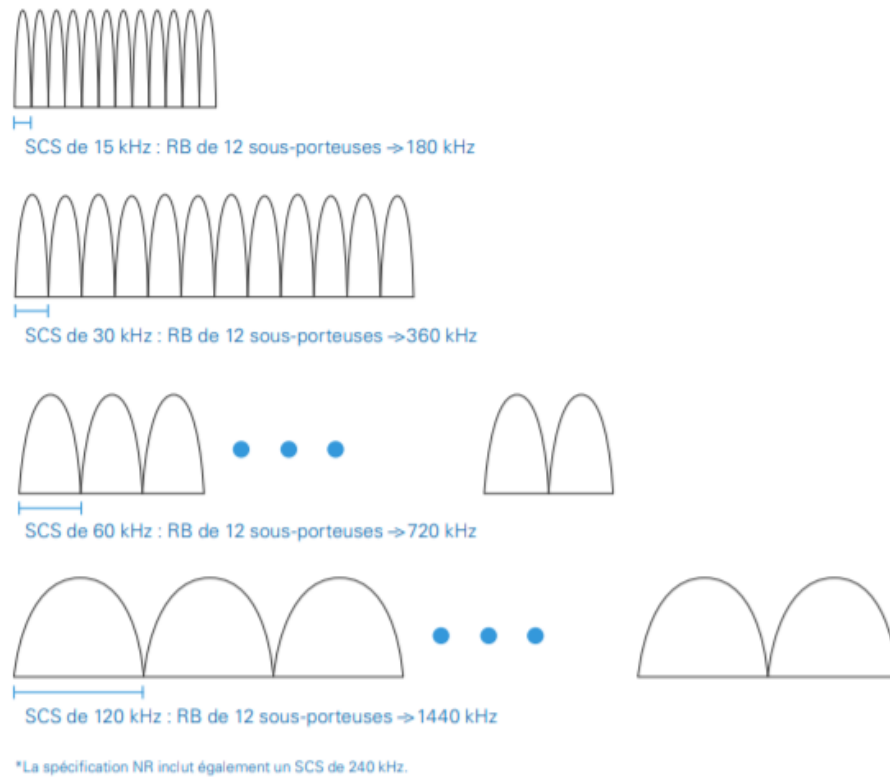


FIGURE 2.9 – Espacement flexible des sous-porteuses [55]

La norme spécifie que la plus petite unité de fréquence affectable, désignée sous le nom de bloc de slots physique, est constituée de 12 sous-porteuses. Par conséquent, plus l'espacement des sous-porteuses est réduit, plus le slot est faible (figure 2.9). Prenons l'exemple dans la figure 2.10, la longueur du symbole peut être réduite de moitié (de 72  $\mu$ s à 36  $\mu$ s) en doublant l'espacement des sous-porteuses (de 15 kHz à 30 kHz). Alors, le temps nécessaire pour transmettre une sous-trame peut être réduit de moitié (de 1 ms à 0,5 ms). Cependant, lorsque la bande de fréquences inférieure à 6 GHz est utilisée, cette option peut ne pas être souhaitable en raison de l'étalement du délai important. Dans ce cas, on peut également envisager de réduire l'intervalle de temps de transmission (TTI) du paquet. Par exemple, en utilisant la transmission au niveau mini-slot (2, 3 symboles) et au niveau de slot (7 symboles), le temps de transmission du paquet ( $T_{tt}$ ) peut être, respectivement réduit à 142, 241 et 500  $\mu$ s. En résumé, si on contrôle la durée des symboles ainsi que le nombre de symboles dans un paquet, on peut obtenir un  $T_{tt}$  inférieur à 1 ms [56] [57].

L'utilisation d'une bande haute fréquence (onde millimétrique : supérieure à 6

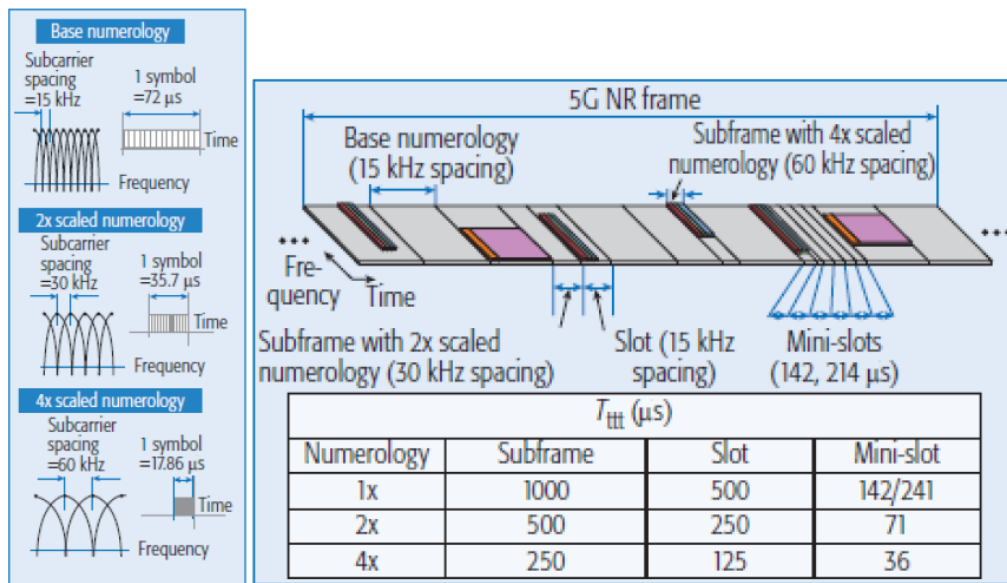


FIGURE 2.10 – Structure de la trame 5G NR [56]

GHz) permet d'avoir un rayon de cellule beaucoup plus petit que celui des systèmes cellulaires conventionnels, de sorte que l'étalement du retard du canal serait également faible. Dans ce cas, nous pouvons réduire la durée de symbole en contrôlant l'espacement des sous-porteuses et sans affecter les performances du système [56] [57].

**Structure du slot NR :** La 5G NR utilise une structure de trame flexible. Elle réduit également les compromis nécessaires en termes de conception pour la prise en charge de caractéristiques clés telles qu'une faible latence, une coexistence avec les déploiements LTE, des transmissions de durée variable et un fonctionnement TDD et FFD dans les spectres sous licence et sans licence. Des configurations de créneau qui varient selon l'espacement des sous porteuses Les créneaux NR comprennent 14 symboles OFDM. Un slot NR (créneau) se compose de 14 symboles OFDM. Des numéologies différentes conduisent à des longueurs de slot différentes, allant de 1 ms avec un espacement de sous-porteuse de 15 kHz à 125 ms avec un espacement de sous-porteuse de 120 kHz. La structure de trame numérote les slots (créneaux) et les regroupe en sous-trames d'une durée d'1 ms. Dix sous-trames d'1 ms forment une trame NR complète (figure 2.11). Le nombre de slots contenus dans une trame varie également selon le choix de la numéologie (Figure 2.12), par exemple, si un espacement de sous-porteuses de 15 kHz est utilisé, la sous-trame contiendra un créneau unique d'1 ms et la trame, 10 créneaux. Un autre exemple : Si un espacement de sous-porteuses de 30 kHz est utilisé, la sous-

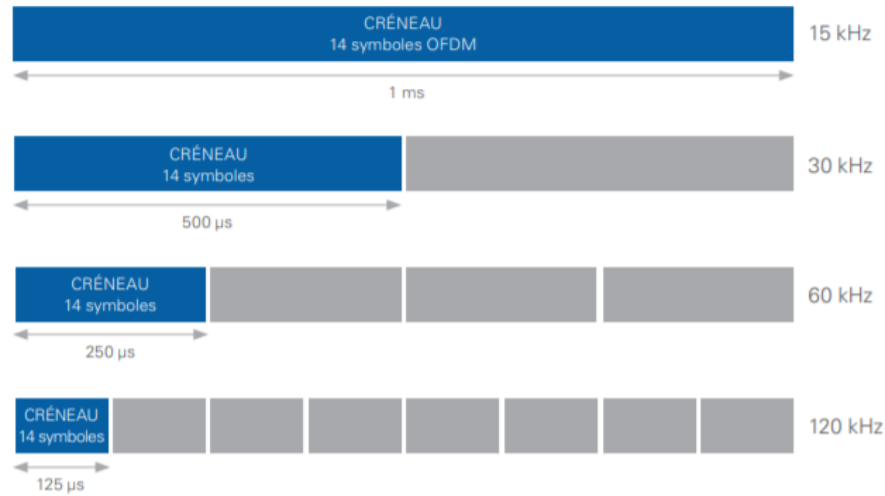


FIGURE 2.11 – Variation de la durée des créneaux[55]

trame contiendra deux créneaux de 500  $\mu$ s et la trame, 20 créneaux. Le concept de transmission non basée sur des slots a été introduit pour NR, également appelé mini-slot et correspond au concept de court TTI (sTTI). Un mini-slot dans NR peut commencer à n'importe quel symbole OFDM et peut avoir une longueur variable ; Des longueurs de mini-slot de 2, 4 ou 7 symboles ont été définies dans la norme. Cela fournit des opportunités de transmission rapide pour, par exemple, le trafic du type IoT entre capteurs/véhicules ou URLLC qui n'est pas restreint par les limites de slot. Ainsi, les mini-slots constituent une solution viable pour les transmissions de paquets très courts à faible temps de latence, indépendamment de l'espacement des sous-porteuses [56] [57]. Dans notre étude, le cas de référence considéré est celui du contrôle du véhicule autonome à partir du cloud et dans ce cas il est peu probable que les paquets échangés soient très courts, par conséquent nous avons retenu la solution d'échange par des slots plutôt que par des mini-slots.

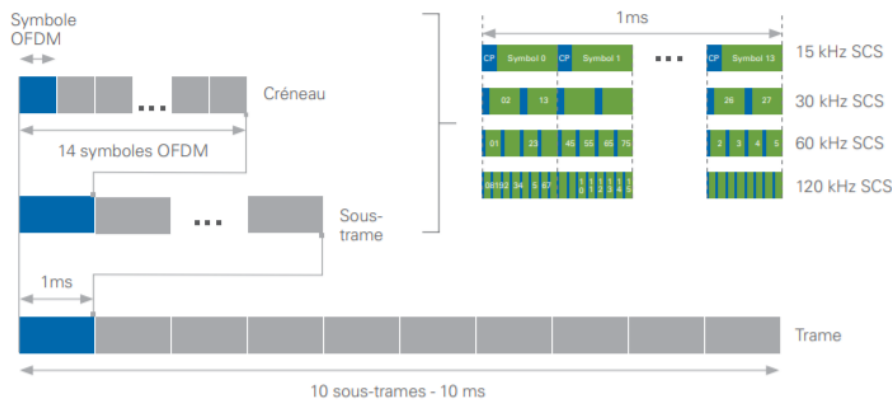


FIGURE 2.12 – Structure de la trame NR [55]

La structure de la ressource temporelle et fréquentielle détermine la grille de slots NR. Selon l'espacement des sous-porteuses, la grille de slots change au fur et à mesure que le nombre de sous-porteuses disponibles et de symboles OFDM change.

### 2.3.2 Solution de Slicing dans la 5G

#### Concept de slicing

Les cas d'utilisation de la 5G requièrent des exigences très strictes. Parmi ces cas d'utilisation, ceux de communications V2X dans les réseaux véhiculaires. Ces derniers sont considérés comme l'un des défis les plus complexes de la 5G en raison de leurs contraintes strictes de latence et de fiabilité. Ainsi, l'architecture 5G doit donc être améliorée et plus efficace afin de répondre aux exigences très strictes de V2X. Le Network slicing (concept de slicing) [58] est reconnu par la communauté des chercheurs de la 5G comme une solution pour répondre aux exigences V2X. Le concept de slicing a été proposé par différentes communautés de recherche, comme l'Alliance pour les réseaux mobiles de prochaine génération (NGMN) [59], le projet de partenariat de troisième génération [60], et Open Networking Foundation [61]. Le 3GPP définit le slicing [60] comme un mécanisme essentiel pour que les réseaux 5G puissent assurer des besoins de services très différents en termes de latence, de fiabilité et de capacité. Cela peut être réalisé en exposant des partitions de ressources et de services. En effet, le slicing défini comme un concept permettant d'exploiter plusieurs réseaux logiques de bout en bout en tant que réseaux indépendants et isolés sur une infrastructure physique commune. Ce concept permet d'optimiser par conséquent l'utilisation des ressources radios disponibles dans le réseau pour une allocation de ressources flexible et efficace.



## Les slices de références 5G

L'architecture de Network slicing a été définie par 3GPP [60] et par différentes autres entités de recherche ([59], [62], [63], [64], [65], [66]) pour gérer les slices. Par exemple, la gestion des slices, définie par 3GPP [67], se fait en quatre étapes (phase de préparation, phase d'instanciation, de configuration et d'activation, phase d'exécution et la phase de mise hors service). Pendant l'étape d'activation, toutes les ressources partagées/dédiées au slice sont créées et configurées.

Le Partenariat public-privé de cinquième génération (Fifth Generation Public Private Partnership :5G-PPP) [68] définit trois slices de référence : enhanced Mobile BroadBand slice, massive Machine-type Communications slice, et Ultra-Reliable and Ultra-Low Latency Communications slice Ces slices sont décrites comme suit :

- Slice enhanced Mobile BroadBand (eMBB) : nécessite des débits de données très élevés pour répondre aux exigences du trafic multimédia, comme la diffusion en continu de vidéos à ultra-haute définition.
- Slice massive Machine-type Communications (mMTC) : Ce slice doit assurer la charge de trafic massive des dispositifs connectés, en transmettant des informations sensibles sans délai, par exemple, les réseaux de capteurs déployés dans les villes intelligentes.
- Slice Ultra-Reliable and Ultra-Low Latency Communications (URLLC) : cette tranche devrait fournir services extrêmement sensibles à la latence, tels que la conduite autonome. Elle requiert une haute fiabilité, une faible latence.

## Slicing pour les communications V2X

La diversité des services V2X ne permet pas une mise en correspondance directe avec les slices de référence susmentionnées. En fait, les applications de sécurité, la conduite autonome et la télécommande des véhicules doivent être prises en charge simultanément. Par exemple, un véhicule peut communiquer avec d'autres véhicules via le système V2V, afin d'envoyer un avertissement de collision. Pendant qu'il reçoit une alerte, via V2P, sur la présence d'un piéton sur le passage piéton. Dans le même temps, le véhicule peut communiquer avec l'infrastructure, via V2I, afin d'échanger des informations sur l'état de la route. Alors qu'une application de gestion du trafic s'exécute en arrière-plan afin d'envoyer des informations de localisation, via V2N, à un serveur d'applications V2X de gestion du trafic.

Prenons l'exemple du document [69] qui présentent les cas d'utilisation V2X les plus importants, proposés dans les releases 14 [70] 15 [71] et 16 [72]. Ces cas d'utilisation sont comme suit et assurent différents exigences :

- safety and traffic efficiency : ce cas d'utilisation consiste en :1) des messages périodiques V2V véhiculant des informations sur le véhicule, qui permettent

aux autres véhicules de détecter l'environnement, 2) des messages basés sur des événements

- Autonomous driving : ce cas d'utilisation est plus strict que les cas d'utilisation liés à la sécurité routière, car un véhicule autonome nécessite une couverture complète du réseau routier, le réseau prenant en charge les communications (principalement V2V) en cas de forte densité de véhicules.
- Tele-operated driving : la conduite télé-opérée est une passerelle entre la conduite humaine et la conduite entièrement autonome. Elle consiste à commander à distance un véhicule à partir d'une station de téléopération. À cette fin, le véhicule doit échanger avec la station de téléopération des informations sur son environnement, notamment un flux vidéo, sa localisation sur une carte et les conditions météorologiques actuelles sur une carte et les conditions météorologiques actuelles. Dans le même temps, la station de téléopération envoie des messages de commande au véhicule télé-opéré.
- Vehicular Internet and infotainment : ce cas d'utilisation est considéré comme un élément indispensable dans l'environnement du véhicule. En effet, la navigation sur Internet, l'accès aux médias sociaux, le téléchargement de fichiers et la diffusion de vidéos HD pour les passagers sont des fonctions essentielles de plus en plus fréquentes.
- Remote diagnostics and management : un AS V2X (serveur V2X) appartenant à un centre de diagnostic peut récupérer les informations envoyées périodiquement par les véhicules en mode vehicle to network (V2N) pour suivre leur état à des fins de diagnostic à distance.

### Slices V2X

Chaque cas d'utilisation décrit ci-dessus présente des exigences différentes en termes de qualité de service et de mobilité. Il est donc nécessaire de concevoir des slices dédiés à chaque cas d'utilisation V2X.

Des types de slicing pour les communications V2X ont été proposés dans les articles [69] et [73]. Par exemple l'article [69] présente quatre ensembles de slices V2X en fonction de la variété des cas d'utilisation V2X. Ces slices sont Autonomous driving slice, Tele-operated driving slice, Vehicular infotainment slice et Vehicle remote diagnostics and management slice comme le montre la figure 2.13.

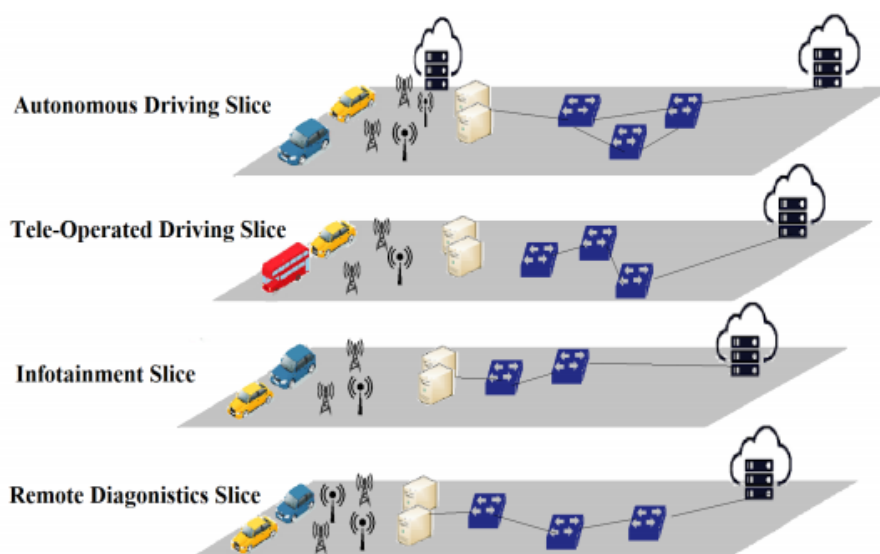


FIGURE 2.13 – Exemple de Slices V2X [69]

### Proposition d'un algorithme mono-slice pour l'allocation des ressources radios dans la 5G

Nous allons dans cette thèse proposer une solution mono-slice avec un algorithme d'allocation de ressources pour faire cohabiter les classes critiques avec les moins critiques. Cette solution représente un gain statistique meilleurs quand à l'utilisation de la capacité du système.

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art des deux parties de la thèse. Pour la première partie, nous avons résumé l'architecture LTE-V et les algorithmes qui ont été proposés dans le domaine de l'allocation des ressources radios dans LTE-V conçus aux réseaux véhiculaires. Nous avons constaté à partir de cet état de l'art, que la majorité de ces travaux connexes ont étudié un scénario dans lequel il n'y a qu'une seule classe de messages et ne prévoient aucune différenciation de service pour les messages STI. Dans ce contexte, nous allons présenter dans les deux prochains chapitres les différentes approches adoptées dans cette partie afin de surmonter cette problématique. Concernant la section de l'état de la partie 5G URLLC, nous avons décrit l'architecture et la nouvelle couche NR de la 5G et nous avons mis l'accent sur le concept du slicing pour les communications V2X. Nous supposons qu'on a un seul slice qui sera pour deux types d'applications véhiculaires

(critique et moins critique). La manière de gestion de ce slice de ressources sera détaillée dans le chapitre 5.



# Chapitre 3

## Proposition PEARL pour l'allocation des ressources radios dans LTE-V mode 3

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous détaillons la première proposition adoptée pour l'allocation de ressources radios dans LTE-V mode 3. D'après l'état de l'art, les approches basées sur la qualité de service mode 3 ne donnent pas explicitement la priorité aux messages safety : la priorité est toujours donnée aux utilisateurs cellulaires et les communications véhiculaires sont pris en charge en 2<sup>ème</sup> lieu. Afin de surmonter cette limite, nous décrivons dans ce qui suit notre approche PEARL.

### 3.2 Priority and guaranteed Resource allocation approach (PEARL)

Nous proposons une technique d'allocation des ressources qui prend en compte la différenciation des messages (trafic de safety et non safety), garantit une quantité minimale de ressources radio aux utilisateurs de sécurité et introduit un mécanisme de priorité pour sécuriser les ressources pour les applications de sécurité dans le cas de réseaux très denses.

Dans ce travail, nous considérons un scénario de véhicule routier où les véhicules sont équipés de dispositifs LTE-V, leur permettant de communiquer entre eux en utilisant leur interface PC5. Nous supposons que le système est configuré pour fonctionner en mode 3 et que toutes les transmissions sont des communications V2V. Ainsi, le mécanisme d'allocation des ressources est contrôlé par la station de

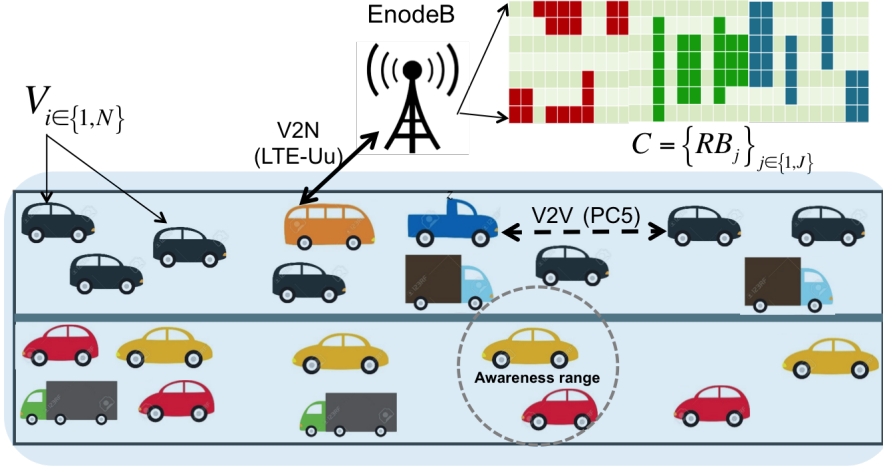


FIGURE 3.1 – Description du système

base, comme le montre la figure 3.1.

Dans ce scénario, l'eNB dessert un ensemble de véhicules  $N (V_i)_{i \in \{1, N\}}$  se déplaçant à une vitesse  $v$ .

La capacité du réseau, à savoir  $C$ , correspond à la quantité de bande passante du réseau que l'eNodeB offre. En pratique,  $C$  peut être exprimé comme suit :

$$C = \{RB_j\}_{j \in \{1, J\}} \quad (3.1)$$

Où  $RB$  est la plus petite ressource radio qui peut être assignée au véhicule, et  $J$  est le nombre total de  $RB$ . Nous supposons que la communication cellulaire utilise une bande différente. Étant donné que le principal objectif des applications des technologies de l'information et de la communication coopératives est d'améliorer la sécurité routière en sensibilisant les usagers de la route à la situation, nous considérons que les véhicules sont capables de transmettre des messages safety (classe 2) et de non-safety (classe 1). En outre, nous supposons que ces messages sont envoyés périodiquement et à intervalles réguliers et que, selon la densité donnée, les messages générés par les véhicules sont répartis comme suit :  $\alpha\%$  des messages sont des messages safety and  $\beta\%$  représente les messages non safety, avec  $\alpha + \beta = 100\%$ . Tous les messages ont la même taille, soit  $MS1=MS2=MS$ , où  $MS1$  correspond aux paquets de classe 1 et  $MS2$  à ceux de classe 2. Afin de satisfaire la largeur de bande demandée par chaque message, le véhicule doit se voir attribuer un ensemble de  $RB$ s qui sont contenus dans une ressource de message ( $MR$ ). Ainsi, la capacité du réseau peut être exprimée comme suit :

$$C = \{RB_j\}_{j \in \{1, J\}} = \{MR_k\}_{k \in \{1, K\}} \quad (3.2)$$

où  $MR_k = \{RB_n\}_{n \in M_k}$  et  $M_k \subset \{1, J\}$  représente la ressource demandée pour le message  $k$ . Nous détaillons la conception de notre approche d'allocation des ressources radio qui vise à prendre en compte les contraintes de QoS des applications V2X. L'idée principale de l'approche PEARL proposée est d'abord de protéger les transmissions des messages safety en réservant une capacité garantie uniquement pour ces paquets. Cette garantie vise à garantir que les paquets safety ont toujours une capacité minimale de réseau à utiliser pour transmettre des informations d'urgence. Cela est très important, surtout lorsque les demandes de transmission de messages non safety sont élevées et que la capacité du réseau peut donc être consommée par ces demandes. En tant que tel, un ensemble de ressources (MR), désigné par G dans la figure 3.2, est exclusivement dédié au trafic de classe 2. Les ressources restantes, à savoir R, sont partagées entre les transmissions de la classe 1 et de la classe 2.

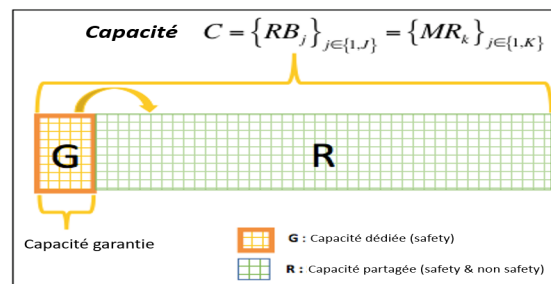


FIGURE 3.2 – Schéma proposé pour le partage des ressources

La deuxième étape de l'approche renforce la classe de trafic safety lorsque celle-ci devient très exigeante en termes de ressources. Pour cela, lorsque les ressources garanties sont toutes consommées, un mécanisme de priorité est mis en place pour servir en premier lieu les paquets safety (niveau de priorité P2) à partir des ressources R afin de répondre à leurs besoins en termes de latence. Même si les paquets non safety ne sont pas prioritaires dans ce type de situation (trafic très dense), nous considérons que les informations véhiculées dans les messages non safety, en particulier les messages de sensibilisation coopérative (CAM), sont peu dynamiques car les véhicules sont presque immobiles. Sur la base de cette observation, et du fait que l'impact du mécanisme de priorité est temporaire puisqu'il est principalement dédié à un trafic très dense, nous pouvons dire que les transmissions non safety ne sont pas sévèrement affectées. Notre approche PEARL est illustrée dans l'algorithme 1.



---

**Algorithme 1 : PEARL**

---

**Données :**  $t_i$  : intervalle du  $i^{ime}$  message  
 $V_{t_i}$  : véhicules présents dans le scénario à l'instant  $t_i$ .  
 $P2, P1$  : classes de priorité pour les trafics safety et non safety respectivement  
 $V_{t_i}^{P2}$  : véhicules envoyant des messages avec la priorité  $P2$  dans le scénario à l'instant  $t_i$   
 $V_{t_i}^{P1}$  : véhicules envoyant des messages avec la priorité  $P1$  dans le scénario à l'instant  $t_i$   
 $C$  : ensemble des ressources totales disponibles  
 $G$  : ensemble des ressources garanties des MRs pour la classe 2  
 $R$  : ensemble des ressources restantes des MR partagées entre les classes 1 et 2.

**pour chaque  $t_i$  faire**  
   **pour chaque  $v \in V_{t_i}^{P2}$  faire**  
     **Si** *Il y a des ressources disponibles MRs dans  $G$*  **Alors**  
       | Allouer un MR aléatoirement de  $G$   
     **SinonSi** *Il y a des ressources non utilisées MRs dans  $R$*  **Alors**  
       | Allouer un MR aléatoirement de  $R$   
     **Sinon**  
       | Refuser l'allocation d'un MR pour  $v$  dans  $t$   
     **FinSi**  
   **fin**  
   **pour chaque  $v \in V_{t_i}^{P1}$  faire**  
     **Si** *Il y a des ressources disponibles MRs dans  $R$*  **Alors**  
       | Allouer un MR aléatoirement de  $R$   
     **Sinon**  
       | Refuser l'allocation d'un MR pour  $v$  dans  $t$   
     **FinSi**  
   **fin**  
**fin**

---

### 3.3 Evaluation des performances et résultats

#### 3.3.1 Paramètres de simulation

Pour évaluer notre proposition, nous utilisons un simulateur open-source basé sur MATLAB appelé LTEV2Vsim [12]. Les simulations sont réalisées sur une trace de trafic réaliste consistant en une autoroute de 16 km avec 3 voies par direction. Nous avons envisagé 3 scénarios de test avec différentes densités de véhicules :

Paramètres	Valeurs
Temps de simulation	10 s
Période du message	0.1 s
Taille du message	300 octets
$\alpha, \beta$	30%, 70%
Bande de fréquence	5.9 GHz
Largeur du canal	10 MHz
Equivalent radiated power	23 dBm
Gain d'antenne Tx/Rx	3 dB
Path loss model	WINNER+ (B1)
Hauteur de l'antenne	1.5 m
Shadowing correlation distance	25 m
Shadowing standard deviation	3 dB (LOS) 4 dB (NLOS)
Duplexing	HD
Noise power over a RB	-110 dBm
Modulation and coding scheme (MCS)	7
Awareness range	Variable

TABLE 3.1 – Paramètres de simulation

faible, moyenne et forte densité avec un nombre total de véhicules égal à 50, 400 et 1000 respectivement. Nous simulons un réseau cellulaire unique avec un eNB LTE-V fonctionnant dans la bande ITS de 5,9 GHz avec une largeur de bande de canal dédiée de 10 MHz. Cette configuration correspond à une capacité de système  $C=200$ MRs. Lors des simulations, deux types de messages sont générés périodiquement toutes les 0,1s : les messages de notification environnementale décentralisée (DENM) en tant que messages safety (classe 2) et les CAM faisant référence à des messages de non safety (classe 1). Nous supposons qu'une fois que les messages DENM sont déclenchés, ils seront périodiques. La taille du message est de 300 octets. Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  sont égales respectivement à 30 % et 70 % et le MCS est réglé à 7. Les paramètres de simulation sont détaillés dans le tableau 3.1 [13].

### 3.3.2 Résultats

Pour évaluer les performances de notre proposition en termes de fiabilité et de latence, nous prenons en compte deux paramètres clés : Le taux de réception de paquet (PRR), qui est le rapport entre le nombre de messages correctement reçues et la somme des nombres de voisins de chaque véhicule. Il est utile d'évaluer la fiabilité de l'algorithme. Et Update delay (UD), qui correspond à la différence de

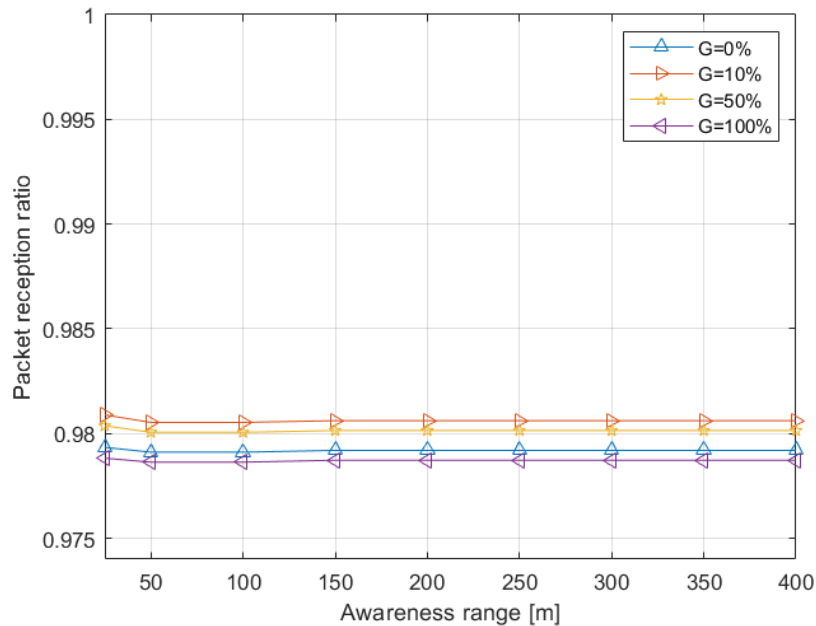
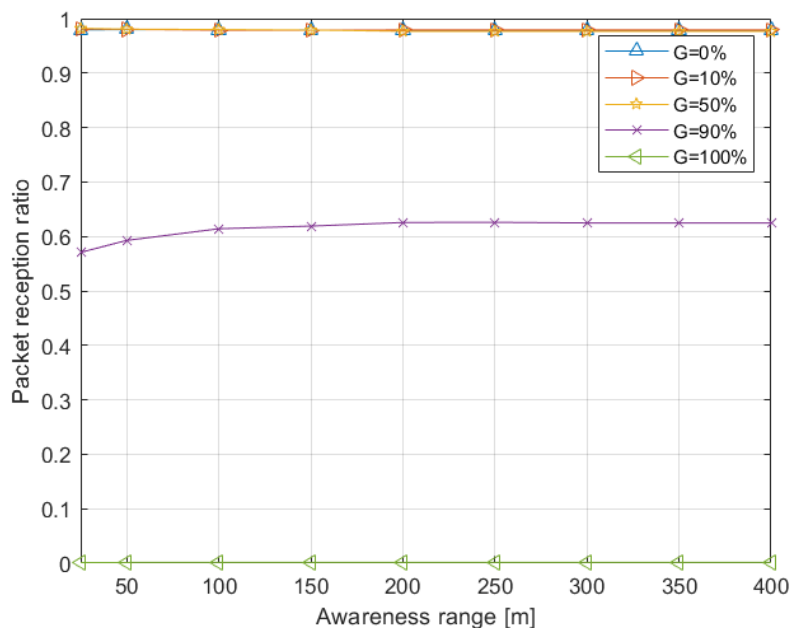


FIGURE 3.3 – Variation du PRR de PEARL DENM pour N=50

temps entre deux réceptions correctes pour chaque couple de véhicules. Il est utile d'évaluer le temps pendant lequel un véhicule ne reçoit aucune information d'un voisin. Des simulations ont été effectuées avec différentes valeurs de seed afin de calculer l'intervalle de confiance. Les résultats ont montré que la marge d'erreur est égale à 0,001 %. Pour analyser l'impact de la taille de la partition des ressources garanties aux DENM, nous faisons varier la valeur de ( $G$ ), comme l'illustre la figure 4.1, de 0 % à 100.

Dans le cas de  $G = 0\%$ , les transmissions du DENM ne bénéficient d'aucune ressource garantie, et par conséquent les classes 1 et 2 partageront la capacité du réseau. Toutefois, la priorité est accordée à la classe 2. Ce schéma correspond à un mécanisme d'allocation aléatoire avec priorité donnée aux messages safety. Il sera comparé à PEARL pour évaluer l'importance des ressources garanties. La figure 3.3 montre la variation du PRR des transmissions du DENM en fonction de awareness range pour un scénario de faible densité. Les résultats montrent que PEARL maintient un rapport PRR élevé (proche de 98%) pour toutes les variations de  $G$ . Ceci est dû au fait qu'il y a une capacité suffisante pour tous les véhicules.

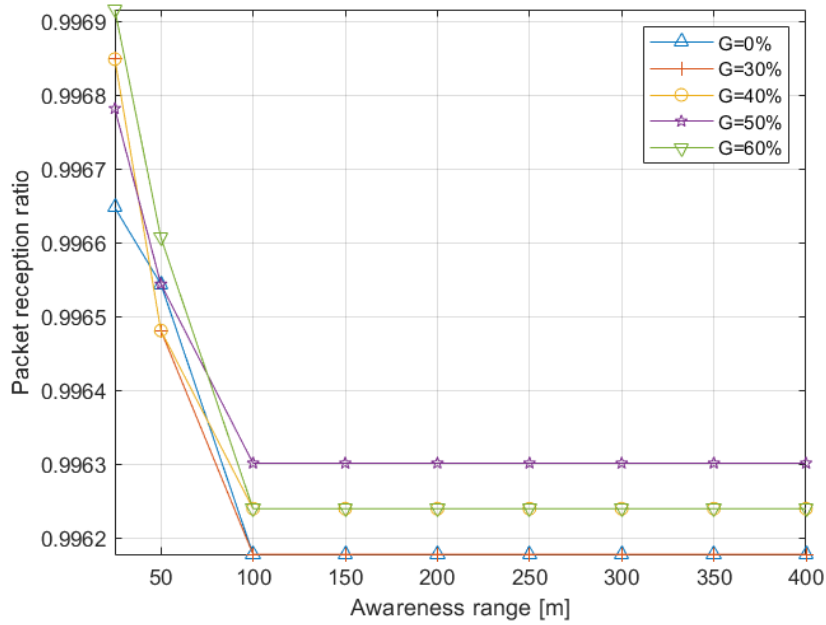
Dans la figure 3.4, les performances des transmissions CAM (un trafic non safety) sont évaluées. Nous pouvons clairement constater pour un trafic faible, presque pour toutes les valeurs de  $G$ , les paquets CAM sont reçus avec succès avec

FIGURE 3.4 – Variation du PRR de PEARL CAM pour  $N=50$ 

un PRR  $> 98\%$  en utilisant PEARL. Même lorsque 90% de  $G$  sont réservés aux DENMs, les CAMs sont toujours reçues avec un PRR  $> 60\%$ . Cela signifie que pour une configuration de scénario à faible densité, suffisamment de ressources sont disponibles et que le mécanisme de priorité mis en œuvre par PEARL et favorisant les transmissions de sécurité (safety) n'a pas d'incidence sur les communications non sécurisées. La figure 3.5 illustre l'impact de la technique PEARL sur les transmissions DENM dans le cas de densités moyennes. La même observation concernant le PRR élevé réalisé par PEARL est également représentée pour différentes valeurs de  $G$ . De plus, PEARL est plus performant que l'approche aléatoire avec priorité à partir de  $G = 40\%$ .

Pour les scénarios à haute densité, nous comparons notre proposition PEARL à un mécanisme d'allocation de ressources appelé Guaranteed Resource Allocation for Safety Messages (GRA-SM). Ce dernier consiste à garantir une capacité réservée pour les messages safety (DENM) sans implémentation de la priorité entre la CAM et le DENM lorsqu'ils demandent des ressources de R.

La figure 3.6 montre la variation du PRR des DENMs lorsque on utilise GRA-SM pour  $N = 1000$ . On peut remarquer que plus le pourcentage de ressources garanties  $G$  est élevé, meilleur est le PRR. Cela s'explique par le fait que les ressources en  $G$  sont exclusivement dédiées à la classe 2. En outre, on peut constater

FIGURE 3.5 – Variation du PRR de PEARL DENM pour  $N=400$ 

que le GRA-SM commence à avoir un  $\text{PRR} > 50\%$  seulement lorsque  $G \geq 80\%$ , ce qui représente une forte limitation du GRA-SM. D'autre part, PEARL confirme sa capacité à obtenir de meilleures valeurs de PRR même dans des situations de trafic très denses et avec des contraintes plus faibles dans la taille de  $G$ . Ces résultats sont confirmés par la figure 3.7 qui montre clairement qu'à partir de  $G = 30\%$ , PEARL est capable de transmettre avec succès des paquets DENMs avec une valeur PRR supérieure à  $66\%$ .

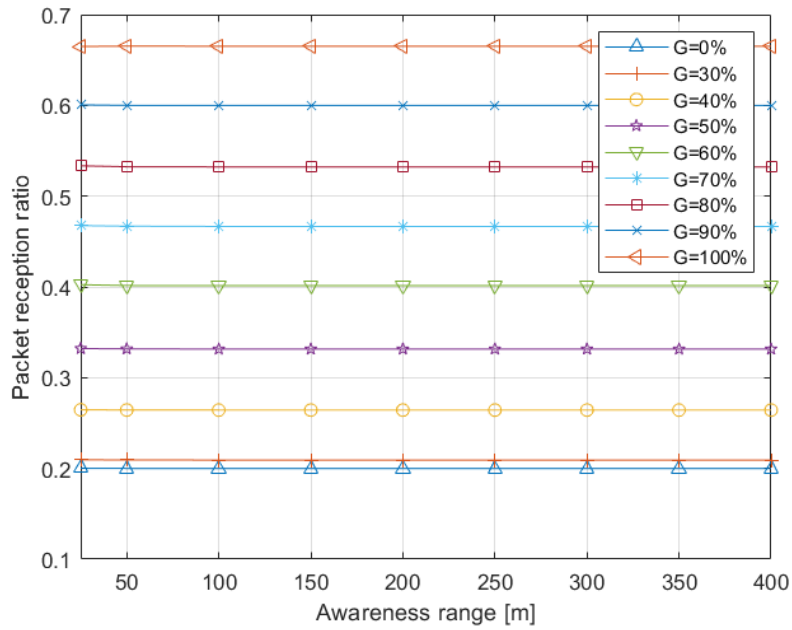


FIGURE 3.6 – Variation du PRR de GRA-SM DENM pour N=1000

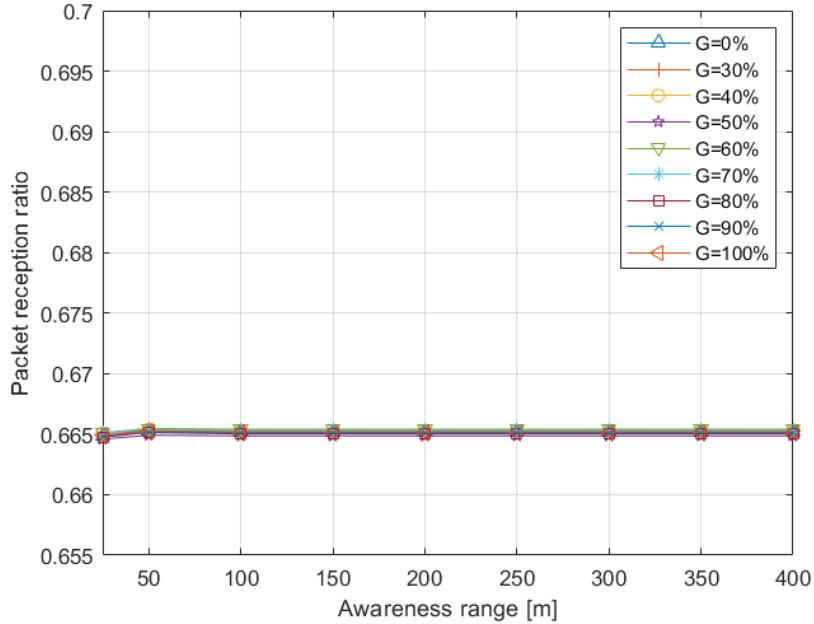
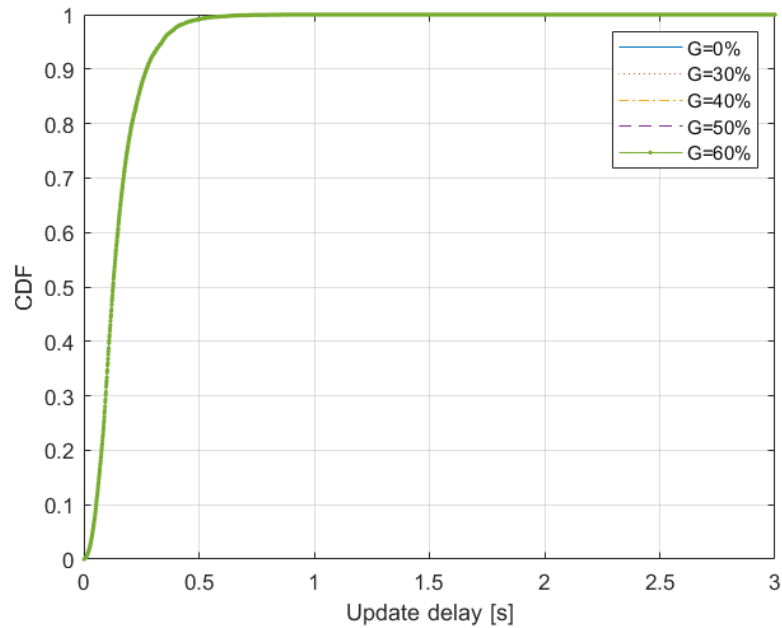


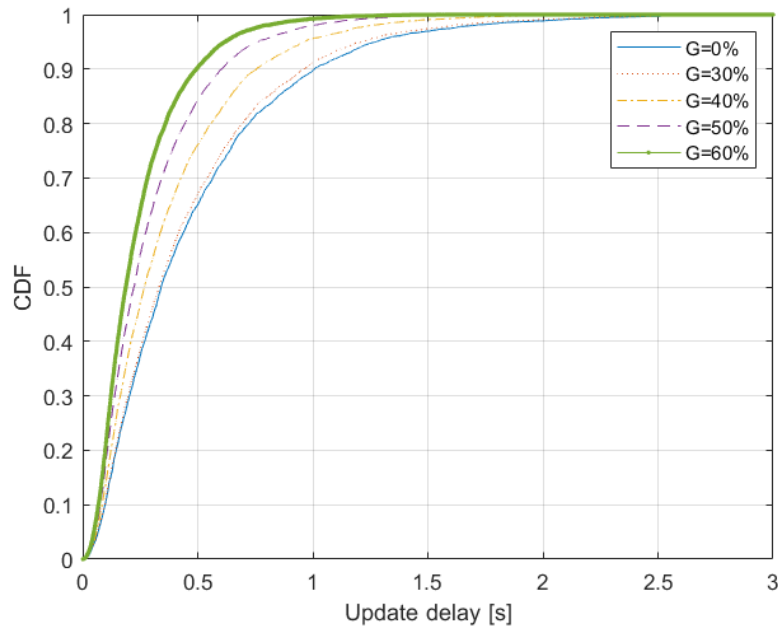
FIGURE 3.7 – Variation du PRR de PEARL DENM pour N=1000

FIGURE 3.8 – Variation du UD de PEARL DENM pour  $N=1000$ 

Pour analyser les performances de PEARL en termes de latence, nous évaluons la fonction de distribution cumulative (CDF) du Update delay (UD).

Les figures 3.8 et 3.9 illustrent la variation de la CDF de l'UD pour les transmissions DENM dans un scénario de haute densité lorsque l'on utilise respectivement les approches PEARL et GRA-SM. Awareness range est fixée à 150 m. Les résultats montrent clairement que l'algorithme PEARL offre de meilleures performances que l'algorithme GRA-SM en termes de latence. En fait, alors que PEARL montre 90% du CDF pour un UD égal à 0,27s pour différentes valeurs de  $G$ , GRA-SM n'est capable de fournir le même percentile que pour un UD égal à 0,5s. Les résultats obtenus reflètent la capacité de l'approche PEARL à répondre efficacement aux exigences des transmissions de messages de sécurité en mettant en œuvre un mécanisme de priorité pour le partage des ressources radio. En outre, les ressources garanties permettent aux messages de sécurité d'avoir un service minimum : pour  $G \geq 30\%$ , PEARL est capable de transmettre avec succès des messages DENMs avec un PRR  $> 60\%$ , et ceci dans les réseaux très denses.

Nous avons étudié les techniques d'allocation des ressources dans les réseaux LTE-V mode 3 en mettant l'accent sur la satisfaction des besoins des applications liées safety. Ainsi, nous avons proposé une approche d'affectation des ressources basée sur les priorités et les garanties, qui réserve d'abord une capacité garantie

FIGURE 3.9 – Variation du UD de GRA-SM DENM pour  $N=1000$ 

pour les flux safety et partage la capacité restante avec d'autres types de trafic. Nous introduisons également un mécanisme de priorité pour protéger les transmissions safety contre le manque de ressources dans le cas de réseaux denses. Les résultats de simulation rapportés corroborent l'efficacité en termes de fiabilité et de latence. Dans les travaux futurs, nous nous concentrerons sur l'amélioration de la fiabilité de notre approche en mettant en œuvre une technique de réutilisation dans les réseaux denses. C'est le sujet de notre 2<sup>ème</sup> proposition : PEARL-RM.

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et détaillé la première proposition PEARL de la première partie de la thèse : L'allocation des ressources radios dans le contexte de LTE-V (4G). Le prochain chapitre fera l'objet de la deuxième proposition PEARL-RM. Cette approche est une amélioration de PEARL. Elle a comme objectif d'améliorer les performances des deux transmissions de messages safety et non-safety.





# Chapitre 4

## Proposition PEARL-RM pour l'allocation des ressources radios dans LTE-V mode 3

### 4.1 Introduction

Nous détaillerons dans ce chapitre notre algorithme PEARL-RM. Cette nouvelle approche est une amélioration de PEARL. En effet, nous proposons un schéma d'allocation des ressources qui prend d'abord en compte la différenciation des messages (trafic safety et non safety) et garantit un minimum de ressources radio aux utilisateurs de sécurité. Deuxièmement, il introduit un mécanisme de priorité et une technique de réutilisation des ressources pour sécuriser les ressources pour les applications de sécurité et fournit des performances appropriées pour les applications non safety, en particulier en cas de trafic très dense.

## 4.2 Priority and guaranteed-based Resource allocation approach with Reuse Mechanism (PEARL-RM)

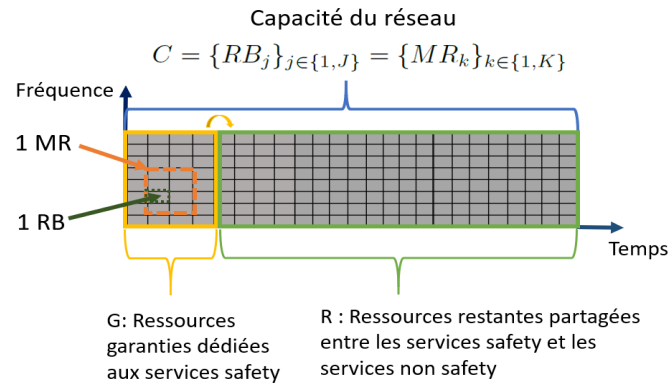


FIGURE 4.1 – Schéma proposé pour le partage des ressources

Nous considérons le même scénario routier décrit dans le chapitre précédent. Le système est configuré pour fonctionner en mode 3 et toutes les transmissions sont des communications V2V. Les véhicules communiquent entre eux en utilisant leur interface PC5. Le mécanisme d'allocation des ressources est contrôlé par la station de base (eNB) qui dessert un ensemble de véhicules se déplaçant à une vitesse  $v$ . La capacité du réseau  $C$  correspond à l'ensemble des ressources offert par l'eNB.

Notre approche PEARL-RM prend en compte les contraintes de QoS des applications V2X. PEARL-RM vise à protéger les transmissions des messages de sécurité (safety) ainsi que des messages non safety.

Comme la première préoccupation de l'approche PEARL-RM est d'aborder et de satisfaire les contraintes de QoS des transmissions de sécurité, PEARL-RM met en œuvre une capacité garantie, à savoir  $G$ , uniquement réservée aux paquets de sécurité. Cette quantité de capacité garantie du réseau garantit qu'une capacité minimale est toujours disponible pour les transmissions de sécurité afin d'éviter l'utilisation de toute la capacité du réseau par des applications non safety, notamment dans le cas d'un trafic à haute densité.

Dans ce schéma de répartition des ressources, la capacité du système est divisée en deux parties :  $G$  est réservée aux applications de sécurité et la partie restante, appelée  $R$ , est partagée entre les deux classes 1 et 2, comme indiqué dans la figure 4.1.

La deuxième étape de l'allocation vient en aide aux transmissions de trafic

de sécurité lorsque ces dernières commencent à être très exigeantes en termes de capacité du réseau. Cette situation est très susceptible de se produire lorsque le trafic routier devient très dense et que les risques de situations dangereuses sont très élevés.

À cette fin, lorsque les ressources garanties sont toutes consommées, un mécanisme de priorité est mis en place pour servir en premier lieu les paquets de sécurité (niveau de priorité de  $P2$ ) à partir des ressources restantes  $R$  pour répondre à leurs besoins en termes de latence. Ensuite, les paquets non safety sont traités par l'ordonnanceur avec un niveau de priorité de  $P1$ , de sorte que  $P2 > P1$ .

En conséquence du mécanisme de priorité établi en faveur des transmissions de sécurité, les demandes non safety peuvent voir leurs demandes totalement ignorées par l'ordonnanceur, surtout lorsqu'il n'y a pas assez de ressources disponibles. Dans ce cas, les transmissions non safety, comme les CAM par exemple, seront fortement affamées et la conscience de la situation des nœuds mobiles sera donc réduite.

Nous améliorons cette situation par l'introduction d'un mécanisme de réutilisation des ressources. Ce dernier consiste à la réutilisation d'un certain nombre de ressources radio qui sont utilisées par les véhicules les plus éloignés en termes de distance par rapport à celui qui émet. Ce faisant, l'efficacité spectrale est augmentée et ainsi plus de ressources radio peuvent être allouées à des transmissions non safety. La distance de réutilisation utilisée pour sélectionner les ressources qui seront réutilisées par d'autres véhicules est calculée selon la méthode euclidienne. Selon ce système, la distance euclidienne,  $d(A, B)$ , entre un véhicule A ayant des coordonnées spatiales  $(x_A, y_A)$  et un véhicule B ayant des coordonnées spatiales  $(x_B, y_B)$  est calculée comme suit :

$$d(A, B) = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \quad (4.1)$$

Il faut noter ici que lorsqu'un véhicule transmet un paquet non safety, la ressource sélectionnée pour être réutilisée doit nécessairement provenir des ressources restantes  $R$ .

La technique de réutilisation, même si elle vise principalement les transmissions non safety en offrant plus de ressources, peut également être utilisée par le trafic safety lorsque les ressources radio sont rares et ne répondent pas totalement à leurs demandes. Cela risque de se produire lorsque le réseau est très dense.

L'algorithme 2 illustre la conception et les différentes phases de notre proposition PEARL-RM.

---

**Algorithme 2 : PEARL-RM**

---

**Données :**  $t_i$  : intervalle du  $i^{ime}$  message

$V_{t_i}$  : véhicules présents dans le scénario à l'instant  $t_i$ .

$P2, P1$  : classes de priorité pour les trafics safety et non safety respectivement

$V_{t_i}^{P2}$  : véhicules envoyant des messages avec la priorité  $P2$  dans le scénario à l'instant  $t_i$

$V_{t_i}^{P1}$  : véhicules envoyant des messages avec la priorité  $P1$  dans le scénario à l'instant  $t_i$

$C$  : ensemble des ressources totales disponibles

$G$  : ensemble des ressources garanties des MRs pour la classe 2

$R$  : ensemble des ressources restantes des MR partagées entre les classes 1 et 2.

**pour chaque  $t_i$  faire**

**pour chaque  $v \in V_{t_i}^{P2}$  faire**

**Si** *Il y a des ressources disponibles MRs dans  $G$*  **Alors**

          | Allouer un MR aléatoirement de  $G$

**SinonSi** *Il y a des ressources non utilisées MRs dans  $R$*  **Alors**

          | Allouer un MR aléatoirement de  $R$

**Sinon**

          | Trouver le véhicule  $x$  qui est le plus éloigné du véhicule  $v$  en  $t_i$

          | Déterminer la ressource MRx utilisée par le véhicule  $x$  en  $t_i$

          | Attribuer la ressource MRx au véhicule  $v$  en  $t_i$

**FinSi**

**fin**

**pour chaque  $v \in V_{t_i}^{P1}$  faire**

**Si** *Il y a des ressources disponibles MRs dans  $R$*  **Alors**

          | Allouer un MR aléatoirement de  $R$

**Sinon**

          | Trouver le véhicule  $x$  qui est à la fois le plus éloigné du véhicule  $v$  et qui a utilisé sa ressource MRx uniquement à partir de  $R$  en  $t_i$

          | Déterminer la ressource MRx déjà utilisée par le véhicule  $x$  en  $t_i$

          | Attribuer la ressource MRx au véhicule  $v$  en  $t_i$

**FinSi**

**fin**

**fin**

---

Paramètres	Valeurs
Temps de simulation	10 s
Période du message	0.1 s
Taille du message	300 bytes
$\alpha, \beta$	30%, 70%
Bande de fréquence	5.9 GHz
Largeur du canal	10 MHz
Equivalent radiated power	23 dBm
Gain d'antenne Tx/Rx	3 dB
Path loss model	WINNER+ (B1)
Hauteur de l'antenne	1.5 m
Shadowing correlation distance	25 m
Shadowing standard deviation	3 dB (LOS) 4 dB (NLOS)
Duplexing	HD
Noise power over a RB	-110 dBm
Modulation and coding scheme (MCS)	7
Awareness range	Variable

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation

## 4.3 Paramètres de Simulation et résultats

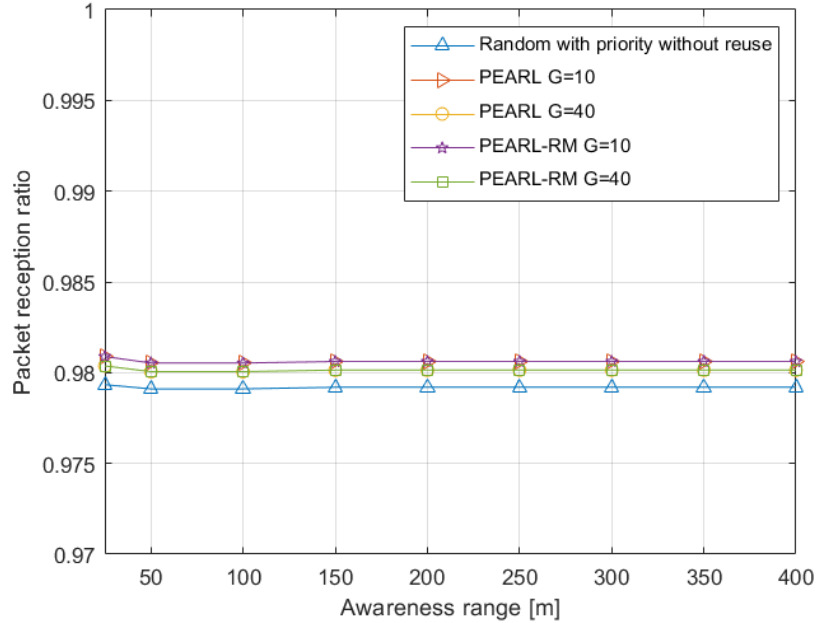
### 4.3.1 Paramètres de simulation

Les différents paramètres de simulation sont décrits dans le tableau 4.1.

### 4.3.2 Résultats de simulation

Deux paramètres de performance ont été utilisées pour l'évaluation de notre proposition d'approche de l'allocation des ressources radio : le taux de réception des paquets (PRR) et Update delay (UD). Des simulations ont été réalisées avec différentes valeurs de seed afin de calculer l'intervalle de confiance. Les résultats ont montré que la marge d'erreur est égale à 0,001%. Pour analyser l'impact de la taille de la partition des ressources garanties consacrée aux DENM, nous faisons varier la valeur de  $G$  de 0% à 40%.

Dans le cas de  $G = 0\%$ , les transmissions des DENM ne reçoivent aucune ressource garantie, et par conséquent les classes 1 et 2 partageront la capacité du réseau. Toutefois, la priorité est accordée à la classe 2. Ce schéma correspond à un mécanisme d'allocation aléatoire avec priorité donnée aux messages de sécurité. Dans le présent document, le terme qui sera utilisé pour décrire cet algorithme est

FIGURE 4.2 – Variation du PRR de DENM pour  $N=50$ 

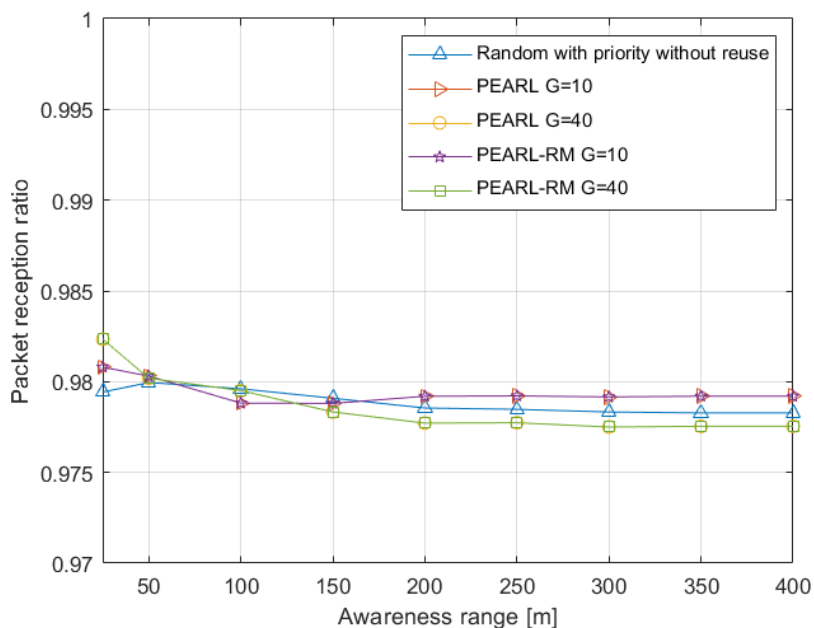
la méthode "aléatoire" et il servira à être comparé à l'approche PEARL-RM.

En outre, nous avons comparé notre proposition à une approche d'allocation des ressources basée sur la priorité et la garantie. Cette dernière réserve un ensemble de ressources aux transmissions du DENM et donne la priorité à ces transmissions dans les ressources restantes. Cette technique sera appelée PRiority with Guarantee allocation (PRG) dans la suite du document (c'est l'approche PEARL). Il est à noter que la PRG (PEARL) ne met pas en œuvre la technique de réutilisation des ressources lorsqu'il n'y a pas suffisamment de ressources pour tous les véhicules.

#### — Performances en termes de fiabilité

La figure 4.2 montre la variation du PRR des transmissions DENM en fonction de awareness range pour un scénario à faible densité. On peut noter que PEARL-RM maintient le rapport PRR le plus élevé (proche de 98%) pour  $G = 10$  et  $G = 40$  parmi toutes les algorithmes comparés. On peut aussi clairement observer que toutes les approches sont capables de fournir un PRR élevé. Cela est dû au fait qu'il y a suffisamment de capacité pour tous les véhicules en cas de faible densité et que, par conséquent, le mécanisme de réutilisation des ressources ne sera pas appliqué.

En ce qui concerne le trafic non lié à la sécurité, les performances des transmissions CAM sont indiquées dans la figure 4.3. Nous pouvons facilement visualiser

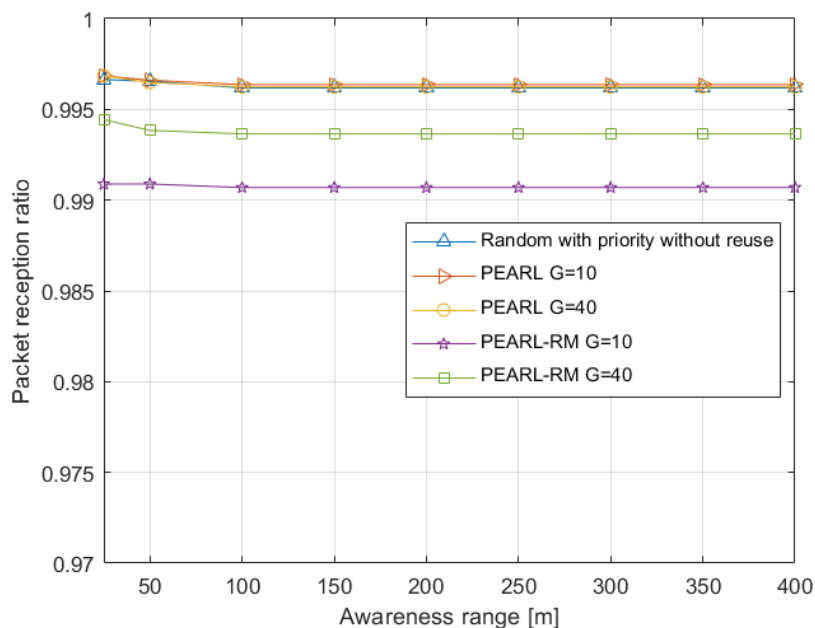
FIGURE 4.3 – Variation du PRR de CAM pour  $N=50$ 

que pour une situation de réseau à faible densité, presque pour toutes les valeurs de  $G$  (10% et 40%), les paquets CAM sont reçus avec succès avec un PRR  $> 97\%$  en utilisant PEARL-RM. La même performance est observée pour les algorithmes Random et PRG(PEARL).

C'est un résultat attendu puisque dans un scénario de faible densité, suffisamment de ressources sont disponibles. Par conséquent, le mécanisme de priorité fourni par PEARL-RM et favorisant les transmissions de sécurité n'a pas d'impact sur les communications non safety. Pour évaluer les performances du PEARL-RM dans une situation plus complexe, la figure 4.4 illustre la variation du PRR pour les transmissions DENM dans le cas de densités moyennes. La même observation concernant le PRR élevé réalisé par le PEARL-RM est également représentée ici pour différentes valeurs de  $G$ . En fait, PEARL-RM fournit dans tous les cas un PRR  $> 99\%$ . Les approches random et PRG(PEARL) offrent également des indicateurs de haute fiabilité.

Afin de mettre en évidence la capacité de notre proposition PEARL-RM à répondre également aux exigences du trafic non safety, nous montrons sur la figure 4.5 la variation du rapport PRR de la CAM en fonction awareness range pour une densité de véhicules égale à 400. Les résultats montrent que la méthode PEARL-RM surpasse nettement les autres techniques et permet d'obtenir un meilleur rapport



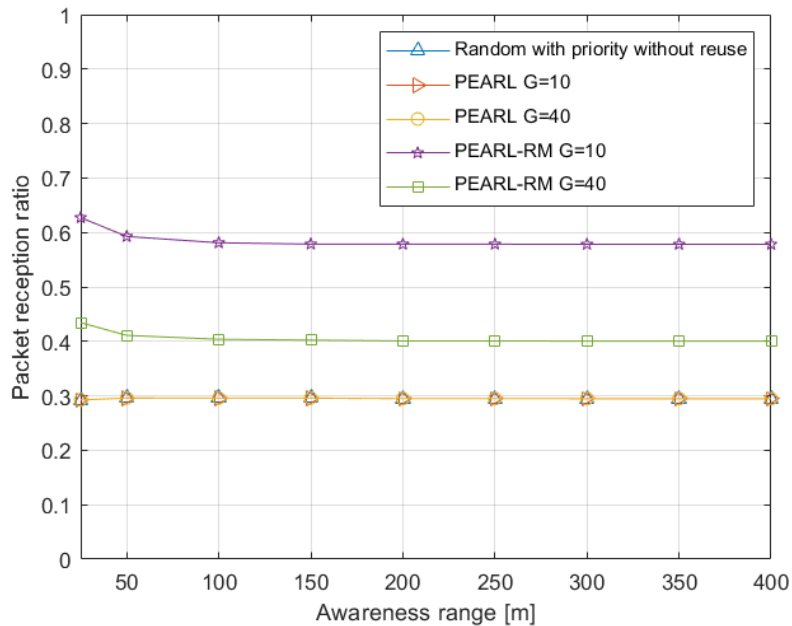
FIGURE 4.4 – Variation du PRR de DENM pour  $N=400$ 

PRR.

Nous remarquons que lorsque  $G = 10\%$ , nous obtenons la meilleure performance du PRR en utilisant PEARL-RM (environ 60%) par rapport au PRG et au Random (environ 30%). Même pour  $G = 40\%$ , PEARL-RM fournit un PRR égal à 40% et surpasse les PRG qui maintiennent toujours un PRR proche de 30%.

Si l'on se réfère à la figure 4.4, on peut clairement voir qu'en utilisant seulement un  $G = 10\%$ , le PRR des DENMs est proche de 99% alors que le PRR des CAMs est proche de 60%. Ainsi, on observe ici une caractéristique essentielle du PEARL-RM qui est sa capacité à satisfaire les exigences du trafic safety et, en même temps, à ne pas ignorer les transmissions ayant des exigences de qualité de service moins strictes.

Pour évaluer le comportement de notre proposition dans un scénario de haute densité, les figures 4.6 et 4.7 mettent en évidence la variation du PRR des DENM et du PRR des CAM respectivement pour  $N = 1000$ . À partir de  $G = 10\%$ , PEARL-RM est capable de transmettre avec succès les paquets DENMs dont la valeur du PRR est supérieure à 99%. En revanche, les approches PRG et Random montrent moins de succès de transmissions des paquets DENM et voient donc leur PRR diminuer de manière significative. Ceci est observé à travers les valeurs du PRR de leur DENM qui ne dépassent pas 66% pour différentes valeurs de

FIGURE 4.5 – Variation du PRR de CAM pour  $N=400$ 

$G$ . De plus, nous soulignons l'amélioration des résultats des CAMs en terme de PRR en utilisant PEARL-RM lorsque  $N = 1000$ . En fait, nous observons des transmissions réussies de CAMs de PEARL-RM pour la plupart des valeurs de  $G$  par rapport à l'approche PRG et Random. En effet, PEARL-RM réalise les meilleures performances alors que PRG et Random ont un impact important sur ces messages sans aucune transmission réussie. Ce résultat représente une forte limitation de la PRG dans les très hautes densités. En outre, nous pouvons noter qu'avec un minimum de  $G$  (10%), nous obtenons une valeur significative de PRR (près de 40%). Le résultat du PRR obtenu est important pour les transmissions de CAM, surtout dans un scénario de haute densité, car les véhicules sont presque immobiles et les transmissions de CAM ne sont donc pas très dynamiques et ne seront pas affectées lors de la garantie des ressources ou même de la priorité donnée aux transmissions de sécurité.

Par conséquent, même dans le cas de densités élevées, PEARL-RM démontre sa capacité à améliorer les performances du PRR des DENM et du PRR des CAM en même temps. Ainsi, avec des contraintes plus faibles en taille  $G$  ( $G = 10\%$ ), nous pouvons clairement constater que PEARL-RM atteint les meilleures valeurs de PRR pour les transmissions de sécurité ainsi que pour les transmissions non safety. Cela s'explique par le fait que notre proposition permet une double protection : la

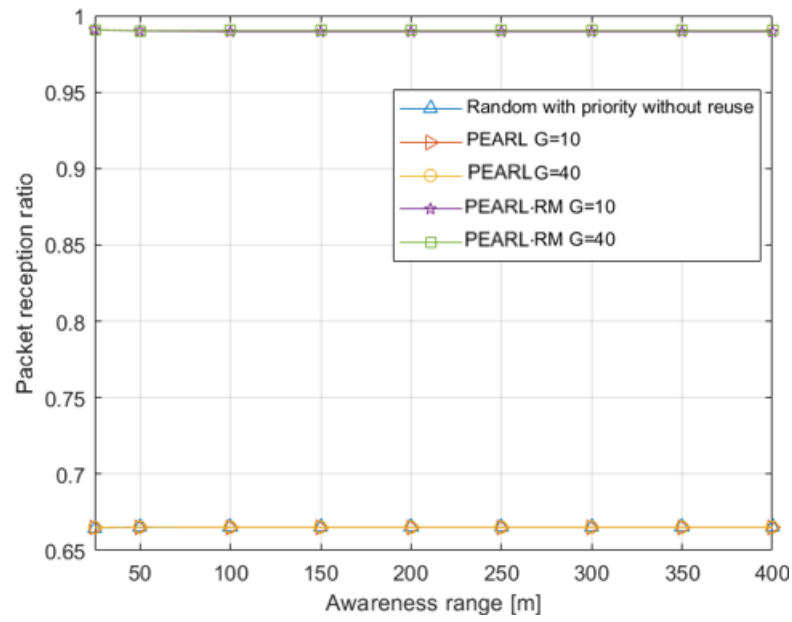


FIGURE 4.6 – Variation du PRR de DENM pour N=1000

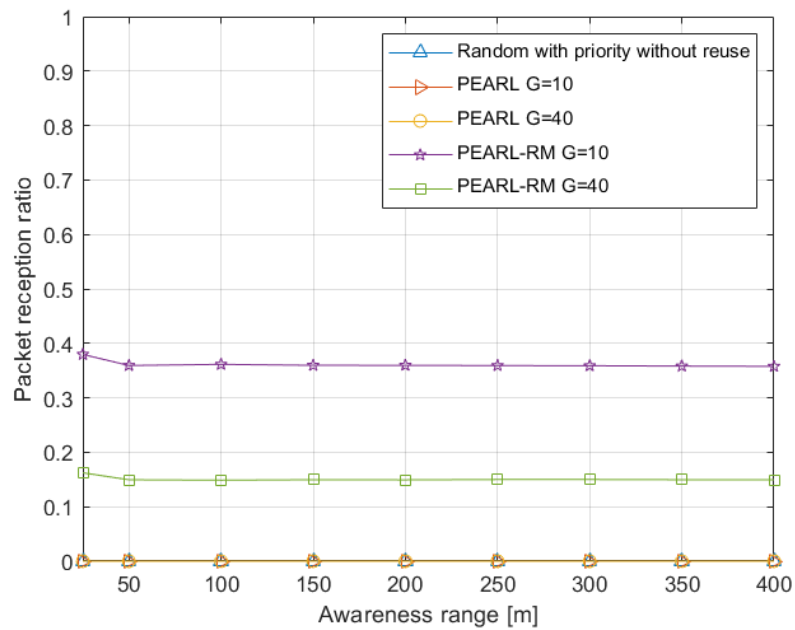


FIGURE 4.7 – Variation du PRR de CAM pour N=1000

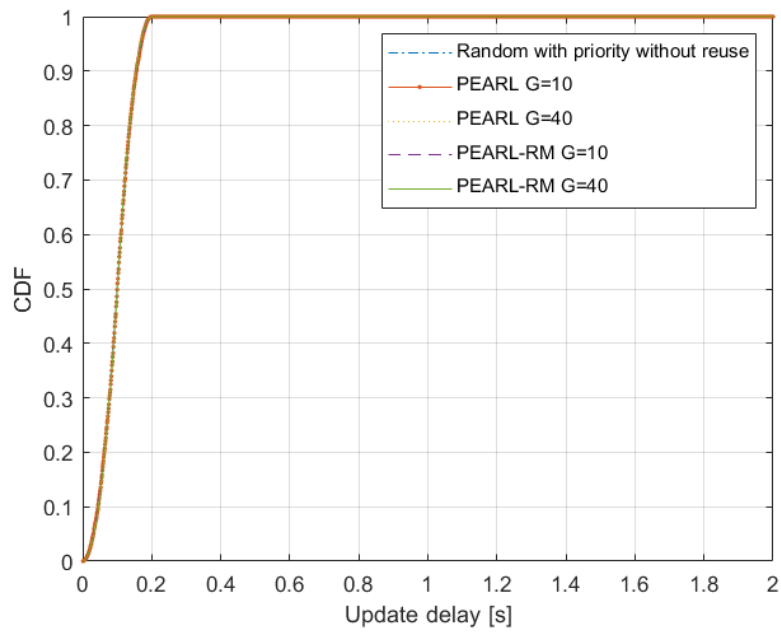


FIGURE 4.8 – Variation du UD de DENM pour N=400

garantie minimale des ressources et la priorité pour la classe 2 et la réutilisation des ressources en cas de manque de ressources pour les classes 1 et 2.

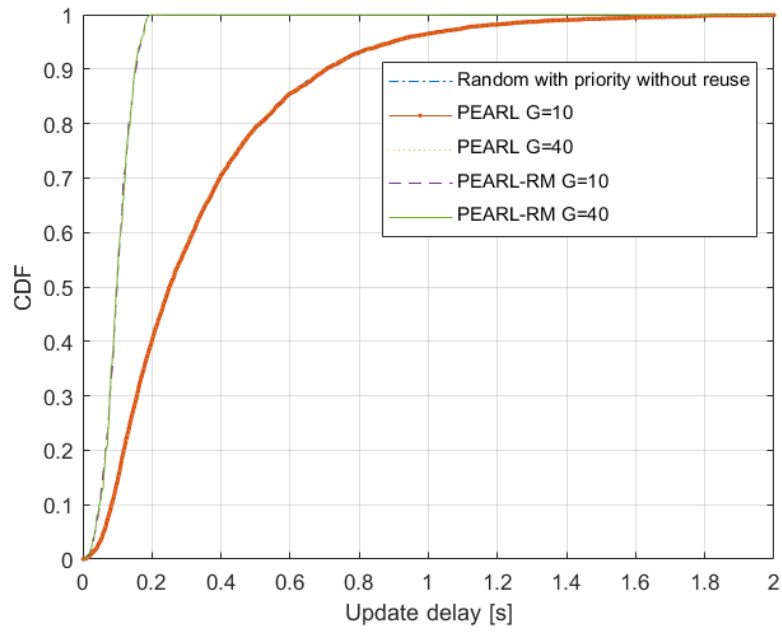


FIGURE 4.9 – Variation de UD de CAM pour  $N=400$

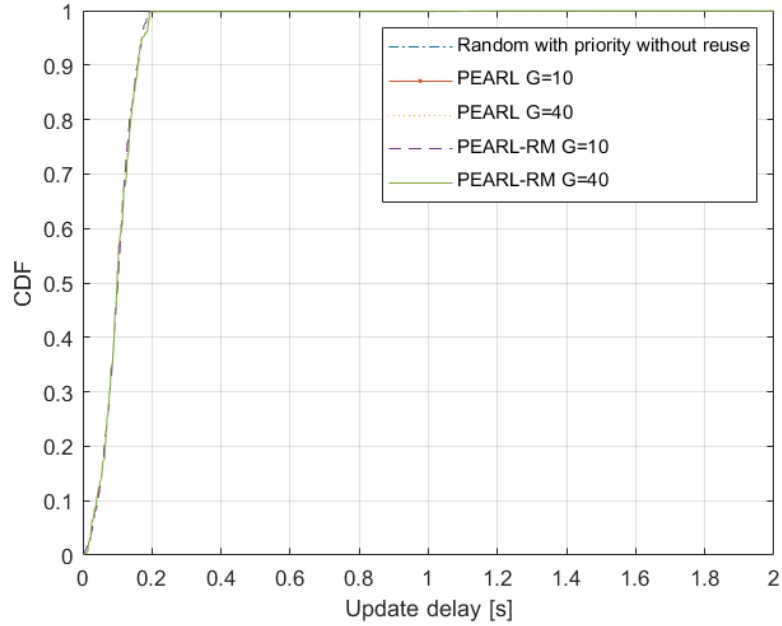
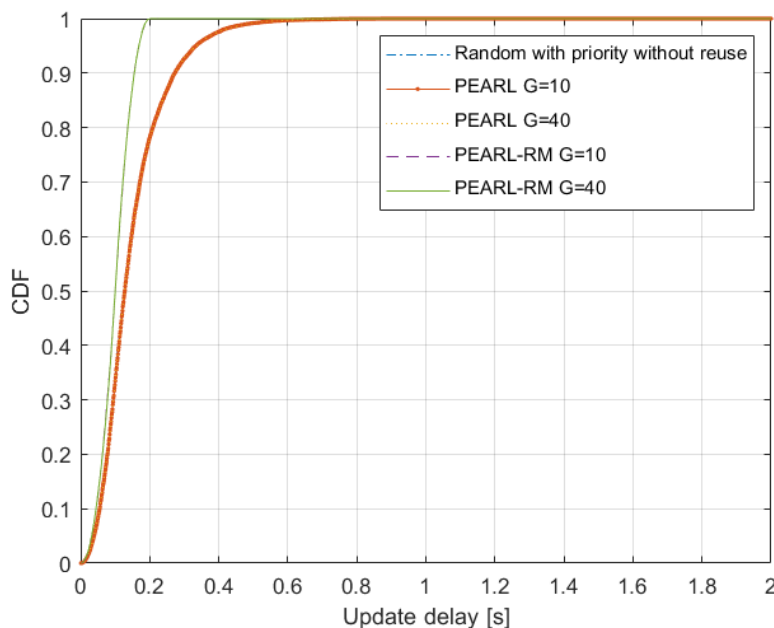


FIGURE 4.11 – Variation de UD de CAM pour  $N=1000$

FIGURE 4.10 – Variation de UD de DENM pour  $N=1000$ 

#### — Performances en termes de latence

Pour analyser les performances de PEARL-RM en termes de latence, nous évaluons la fonction de distribution cumulative (CDF) du UD pour awareness range égale à 150 m. La figure 4.8 illustre la variation de la CDF de l'UD pour les transmissions DENMs en densité moyenne. PEARL-RM montre 95% du CDF de l'UD est égal à 0,169s pour différentes valeurs de  $G$ . En outre, PEARL-RM présente de meilleur performance en termes de UD par rapport aux autres approches pour les transmissions de CAMs. En fait, la figure 4.9 montre 95% de CDF UD est égal à 0,172s pour différentes valeurs de  $G$ . Mais, PRG et Random fournissent un UD égal à 0,91s.

La figure 4.10 montre la variation de la CDF de UD pour les transmissions de DENM dans un scénario de haute densité. Alors que PEARL-RM montre 95% de la valeur de CDF de l'UD est égal à 0,17s pour différentes valeurs de  $G$ , PRG et Random ne sont en mesure de fournir le même percentile que pour un UD égal à 0,27s. Ces résultats confirment que notre proposition offre de meilleures performances que les algorithmes PRG et Random en termes de latence.

PEARL-RM améliore également la variation de la CDF d'UD pour les transmissions de CAM dans un scénario de haute densité. Ainsi, la figure 4.11 montre un 95% du CDF de l'UD utilisant PEARL-RM est égal à 0,173s pour différentes

valeurs de  $G$ . Ce résultat est très proche de l'UD indiqué par les transmissions DENM, ce qui montre que PEARL-RM améliore les performances de latence des transmissions non safety en plus de celles safety. Ces résultats s'expliquent par la réutilisation des ressources fournies par notre approche qui permet d'obtenir des transmissions plus réussies que les algorithmes PRG et Random.

En résumé, notre proposition surpasse les algorithmes comparés en termes de fiabilité et de latence. Ce résultat est significatif, même dans les scénarios les plus denses : PEARL-RM est capable, pour  $G \geq 10\%$ , de transmettre avec succès des messages de sécurité (DENM) avec le plus haut rapport PRR et le plus bas UD de toutes les approches comparées. En ce qui concerne les messages non safety (CAM), les résultats reflètent la capacité du PEARL-RM à atteindre des valeurs intéressantes de PRR et d'UD, en particulier avec un pourcentage minimum de garantie de ressources (10 %) dans différents scénarios de densité, notamment dans le cas d'un scénario très dense.

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit notre proposition PEARL-RM pour l'allocation des ressources radios dans le contexte de LTE-V. Le prochain chapitre entame la deuxième partie 5G-URLLC. Nous nous intéressons dans les chapitres 5 et 6 aux communications URLLC-5G et à la modélisation analytique pour l'allocation des ressources radios dans le contexte de la 5G.

# Chapitre 5

## Analyse par simulation des performances de la politique proposée de l'allocation des ressources radios mono-slice dans la 5G

### 5.1 Introduction

Dans le contexte de la 5G, il existe un nombre important d'algorithmes d'allocation de ressources dans la 5G ([74], [75], [76], [77], [78], [79], [80], [81]). Cependant ces propositions ne proposent pas d'étude analytique de l'allocation des ressources radios dans la 5G et en particulier pour les réseaux véhiculaires 5G. La modélisation a été abordée dans la littérature uniquement dans le contexte de la 4G (LTE-V). Les auteurs dans [82] ont proposé un modèle mathématique de l'allocation des ressources radios sous un système 4G pour les communications V2X. Le modèle de communication est basé sur le processus de Markov pour évaluer la fiabilité du LTE-V. Le paramètre de performance évalué est le taux de livraison de paquets (PDR) du LTE-V sur la base de ce modèle. Ils ont utilisé un processus de Poisson pour modéliser la distribution des véhicules sur une autoroute, puis ils ont combiné le modèle de communication avec la distribution des véhicules pour dériver le PDR dans ce scénario. Après simulation, ils comparent les résultats de la simulation et les résultats mathématiques. Cette comparaison montre que les résultats de la simulation correspondent bien au modèle et valide leurs hypothèses initiales. Nous nous intéressons à la modélisation d'un système 5G afin de proposer une méthode d'évaluation de performances d'un système avec un algorithme



d'allocation de ressources proposé.

## 5.2 Description du modèle et algorithme proposé

La théorie des files d'attente joue un rôle important dans la phase de conception du réseau car elle permet au concepteur d'élaborer de bons modèles de représentation afin de prédire correctement le comportement aléatoire du système et de calculer la quantité de slots nécessaires pour satisfaire la qualité de service requise par les utilisateurs du réseau [83].

Cette modélisation permet en effet de dimensionner et optimiser les performances des réseaux selon des paramètres de performance connus comme le délai, le taux de pertes...

Dans ce contexte, nous allons développer un modèle mathématique pour la gestion des slots radios pour les communications véhiculaires basé sur la théorie des files d'attente. On considère dans un seul slice que l'ensemble de slots radios (capacité totale) est partagée uniquement entre les applications véhiculaires.

### 5.2.1 Applications considérées dans le système

Dans ce contexte, on adopte deux types de flux de services pour les applications véhiculaires temps réel :

- Les applications temps réel critique (URLLC) pour le monitoring de la navette autonome à distance : pour ce type d'application les messages échangés en voie montante (du véhicule au centre de contrôle) et descendante (du centre de contrôle au véhicule) sont des flux de contrôle pour aide à la décision au véhicule.
- Et les applications temps réel de type streaming pour l'envoi de vidéos, audio par navette autonome à distance : pour ce type d'application, les messages en voie montante sont des flux streaming (vidéo compressé ou audio compressé) et les messages en voie descendante sont des flux audios. (généralement des paquets de taille petite (multimedia compressé)).

### 5.2.2 La méthode de la gestion des slots radios entre les deux types d'application

Nous supposons l'existence de deux classes avec deux files d'attente et deux niveaux de priorité pour les deux types de trafic dans le scénario à savoir :

1. Classe 1 : la classe la moins prioritaire et correspond aux communications véhiculaires de type streaming (temps réel moins critique).

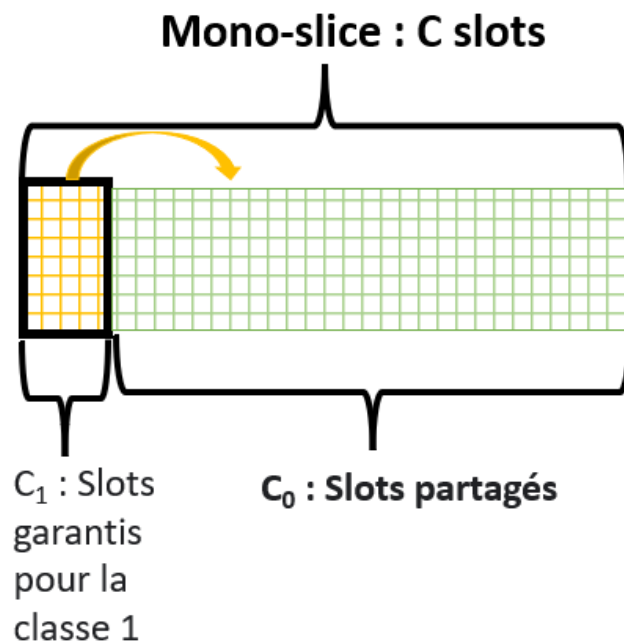


FIGURE 5.1 – Partionnement des slots radios

2. Classe 2 : la classe la plus prioritaire et concerne les communications véhiculaires URLLC.

Pour les deux classes les ressources radios ou les slots sont réparties de la manière suivante comme l'indique la figure 5.1) :

- Des slots garantis pour la classe 1
- Des slots dynamiquement partagés entre les deux classes

Au début de chaque trame, les paquets de la classe prioritaire sont servis en premier lieu, puis les paquets de la classe 1.

On suppose que les paquets arrivant dans deux files d'attente avec des classes 1 et 2 de priorité  $P1$  et  $P2$  (ordonnanceur de priorité avec  $P2 > P1$ ). On suppose aussi que les paquets appartenant à une même classe sont servis sur une base FIFO.

Nous avons opté pour un ordonnanceur de priorité dans un système synchrone. Dans ce contexte, il n'est pas pertinent de réserver des ressources pour la classe 2 vu qu'elle est prioritaire de toute manière. Par contre, la classe 1 a besoin d'un minimum de ressources pour ne pas souffrir de la starvation dans le cas où la classe 2 consomme toutes les ressources disponibles. On pourra garantir pour les deux classes dans les scénarios où on implémente l'algorithme Weighted fair queueing (WFQ) par exemple.

### 5.2.3 Modèle de trafic d'arrivées

Le processus d'arrivée des paquets au niveau de la couche MAC suit une distribution de Poisson composé

- Processus d'arrivée de la classe  $i$  dans une trame  $n$  de durée  $t$  est  $A_{i,n}$ ;  $i = 1, 2$  qui suit une distribution de Poisson d'intensité  $\lambda_i$ ;  $i = 1, 2$
- Un paquet de la classe  $i$ ;  $i = 1, 2$  contient une rafale de slots qui suit une distribution binômiale  $J_i$  de paramètres  $(m_i, p_i)$  où  $m_i$  représente la taille maximale en termes de slots de la rafale (paramètre qui résulte de la fragmentation des trames par les protocoles de couches protocolaires situées au dessus de la couche MAC) et  $p_i$  est le paramètre de la distribution binômiale compris entre 0 et 1 qui impacte la statistique d'arrivée de la taille des rafales, une valeur grande (resp petite) de  $p_i$  a comme conséquence une plus grande fréquence d'arrivée de grande (resp petite) taille de rafale. Alors :
  - $E[J_i] = m_i p_i$
  - $\sigma_{J_i}^2 = m_i p_i (1 - p_i)$
- Le flux total agrégé d'arrivée des trames au niveau de la couche MAC suit donc une distribution de Poisson d'intensité  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$
- Le flux d'arrivée des slots de la classe  $i$  durant une trame  $n$  de durée  $T$ ;  $i = 1, 2$  sera noté  $A_{i,n}$  avec
  - $E[A_{i,n}] = \lambda_i T m_i p_i$
  - $\sigma_{A_{i,n}}^2 = \lambda_i T E[J_i^2]$

### 5.2.4 Modélisation par la chaîne incluse

Le service requis est de type D (suit une loi constante : service déterministe). Les paquets présents dans la file vont être servis par un ensemble de slots et le nombre maximum de ces slots représente la capacité maximale des slots dans une trame de capacité  $C$ . En total, on aura  $C \cdot \text{slots}$  à distribuer aux différentes demandes au début de chaque trame (trame physique de longueur fixe). Ainsi, le service est modélisé par une file M/D/C à temps discret.

Soient :

$\lambda_i$  = l'intensité du processus d'arrivée des paquets de priorité  $i$ ,

$C$  : nombre de total des slots disponibles

$C_1$  : nombre de slots garantis de la classe 1

$C_0$  : nombre de slots dynamiquement partagées entre les deux classes

$n$  : numéro de la trame

$T$  : la durée de la trame PHY (supposée constante dans notre étude).

$\rho$  = le nombre moyen d'arrivées de la trame  $n$  en termes de slots /  $C$

On suppose que les processus d'arrivée et de service, pour les différentes priorités, sont indépendants entre eux.

Ainsi on définit :

$$\lambda = \sum_{i=1}^2 \lambda_i \quad (5.1)$$

qui représente l'intensité du trafic total entrant,

$$\rho = \sum_{i=1}^2 \rho_i \quad (5.2)$$

$\frac{\lambda_i}{\lambda}$  : s'interprète comme la probabilité qu'une trame MAC arrivant soit de type  $i$ .

$\rho_1$  = le nombre moyen d'arrivées de la trame  $n$  en termes de slots de la classe 1 /  $C$

$$\rho_1 = \frac{\lambda_1 m_1 p_1}{C}$$

$\rho_2$  = le nombre moyen d'arrivées de la trame  $n$  en termes de slots de la classe 2 /  $C$

$$\rho_2 = \frac{\lambda_2 m_2 p_2}{C}$$

Avec

Le nombre moyen d'arrivées de la trame  $n$  en termes de slots de la classe  $i$  = taux moyen d'arrivées de la classe  $i$  (Poisson)  $\times$  longueur moyen du burst de la classe  $i$

Dans un système stable  $\rho < 1$  ou encore  $\rho_1 + \rho_2 < 1$ , le nombre moyen d'arrivées de la trame  $n$  (de durée  $T$ ) en termes de slots doit être strictement inférieur à  $C$ .

On désigne par :

$Y_{1,n}$  : nombre de clients de la classe 1 juste après le départ de la trame  $n - 1$

$Y_{2,n}$  : nombre de clients de la classe 2 juste après le départ de la trame  $n - 1$

L'objectif est d'étudier le système en observant le nombre de clients de la classe 1 et de la classe 2, avec :

$Y_n = \begin{pmatrix} Y_{1,n} \\ Y_{2,n} \end{pmatrix}$  : nombre de clients juste après le départ de la trame  $n - 1$

$Y_{n+1} = \begin{pmatrix} Y_{1,n+1} \\ Y_{2,n+1} \end{pmatrix}$  : nombre de clients après le départ de la trame  $n$

$D_{n,T} = \begin{pmatrix} D_{1,n} \\ D_{2,n} \end{pmatrix}$  : représentent les départs dans la trame  $n$  des deux classes

$A_{n,T} = \begin{pmatrix} A_{1,n} \\ A_{2,n} \end{pmatrix}$  : représentent les Arrivées dans la trame  $n$  des deux classes

Nous avons deux files d'attente, une pour chaque classe de priorité. Pour chaque file de classe on déterminera ses arrivées des paquets ainsi que ses départs dans le but de calculer le nombre de clients après le départ de la trame  $n$  comme suit :

$$Y_{n+1} = Y_n - D_{n,T} + A_{n,T} \quad (5.3)$$

avec

$$Y_n = \begin{pmatrix} Y_{1,n} \\ Y_{2,n} \end{pmatrix}, D_{n,T} = \begin{pmatrix} D_{1,n} \\ D_{2,n} \end{pmatrix}, A_{n,T} = \begin{pmatrix} A_{1,n} \\ A_{2,n} \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

L'ordonnanceur de priorité fait que la classe 1 apparaît transparente à la classe 2 (en dehors de  $C_1$ ). Mais de point de vue de la classe 1, la quantité de slots disponible en dehors de  $C_1$  dépend de l'activité de la classe 2.

La file d'attente admet un régime stationnaire ssi  $\rho < 1$ .  
Connaissant  $Y_n$ , les départs  $D_{1,n}$  et  $D_{2,n}$  sont connus et ne dépendent pas du passé avant le début de la trame  $n$ ,

$A_{1,n}$  et  $A_{2,n}$  sont des arrivées suivant le processus de Poisson (Markovien sans mémoire). En effet, les arrivées dans la trame  $n$  sont indépendants du passé qui est avant le départ de la trame  $n$ .

Donc, conditionnellement à la connaissance du présent  $Y_n$ , le futur  $Y_{n+1}$  et le passé avant le début de la trame  $n$  sont indépendants entre eux.  $Y_n$  est donc une chaîne de Markov à états discrets et temps discret. Et elle admet une distribution de probabilité stationnaire ( $\rho < 1$ )

### Calcul des départs et des arrivées

\* Calcul de  $A_{n,T}$

$A_{n,T}$  représentent les Arrivées pendant la trame  $n$  de durée  $T$  des deux classes, comme suit :

$$A_{n,T} = \begin{pmatrix} A_{1,n} \\ A_{2,n} \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

$A_{1,n}$  et  $A_{2,n}$  représentent les nombres des clients arrivant dans le système au début de la trame  $n$  pour la classe 1 et la classe 2 respectivement.

Ce processus d'arrivées est un processus de poisson composé pour les 2 classes.

— Classe 1 :Poisson composé  $\{\lambda_1, (m_1, p_1)\}$

— Classe 2 :Poisson composé  $\{\lambda_2, (m_2, p_2)\}$

La trame couche PHY de durée  $T$  (supposée constante).

On s'intéresse aux arrivées dans la couche MAC et/ou dans la couche PHY en régime stationnaire.

1/ Le processus d'arrivées dans la couche MAC est Poisson d'intensité

$\lambda_1 + \lambda_2$  multiclasse (2 classes).

2/ Processus d'arrivées des slots dans la couche PHY.

Soit  $K'$  = nombre des slots arrivés durant la trame  $T$  ( $A_{1,n} = A_{1,T}$  : arrivées de poisson composé pour la classe 1 et  $A_{2,n} = A_{2,T}$  : arrivées de poisson composé pour la classe 2) ;

Par définition, le poisson composé  $Z$  s'écrit sous la forme suivante :

$$Z = \sum_{n=0}^N Y_n \quad (5.6)$$

Où  $N$  est un processus de Poisson et  $Y_n$ , pour tout  $n$ , est une suite de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées et indépendantes de  $N$ .

On donc

$$K' = A_{1,T} + A_{2,T} \quad (5.7)$$

$$K' = \sum_{n=0}^{K_1} B_{1,n} + \sum_{n=0}^{K_2} B_{2,n} \quad (5.8)$$

tel que  $K_1$  suit la loi Poisson( $\lambda_1$ ),  $K_2$  suit la loi Poisson d'intensité ( $\lambda_2$ ) et pour tout  $n$ ,  $B_{1,n}$  suit la loi binomiale  $B_1$  de paramètres ( $m_1, p_1$ ) et pour tout  $n$ ,  $B_{2,n}$  suit la loi binomiale  $B_2$  de paramètres ( $m_2, p_2$ )

On a donc :

$$K' = \sum_{n=0}^{K_1} B_{1,n} + \sum_{n=0}^{K_2} B_{2,n} \quad (5.9)$$

$K' = K_1 B_1 + K_2 B_2$  arrivées venant chacune des classes

Notons que  $E[K'] < C$ . A partir des calculs établis dans l'annexe A, on a

$$P \{K_1 B_1 = k'_1\} = \sum_{b_1=1}^{m_1} \frac{(\lambda_1 b_1 T)^{k'_1}}{k'_1!} e^{-\lambda_1 b_1 T} \frac{m_1!}{b_1!(m_1 - b_1)!} p_1^{b_1} (1 - p_1)^{m_1 - b_1}$$

Et pour la classe 2

$$P \{K_2 B_2 = k'_2\} = \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{(\lambda_2 b_2 T)^{k'_2}}{k'_2!} e^{-\lambda_2 b_2 T} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2}$$

Rappelons que  $E[K'] < C$ .

Donc, on définit  $A_{1,n}$  comme étant la probabilité d'avoir  $k'_1$  clients pendant la durée de la trame PHY  $n$  (de durée  $T$ ) :

$$P \{A_{1,n} = k'_1\} = P \{K_1 B_1 = k'_1\} = \sum_{b_1=1}^{m_1} \frac{(\lambda_1 b_1 T)^{k'_1}}{k'_1!} e^{-\lambda_1 b_1 T} \frac{m_1!}{b_1!(m_1 - b_1)!} p_1^{b_1} (1 - p_1)^{m_1 - b_1}$$

Et  $A_{2,n}$  comme étant la probabilité d'avoir  $k'_2$  clients arrivant pendant la durée de la trame PHY  $n$  (durée  $t$ ) :

$$P \{A_{2,n} = k'_2\} = P \{K_2 B_2 = k'_2\} = \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{(\lambda_2 b_2 T)^{k'_2}}{k'_2!} e^{-\lambda_2 b_2 T} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2}$$

\* Calcul de  $D_{n,T}$  (Plus de détails de calcul dans l'annexe B)

$D_{n,T}$  représentent les départs pendant la trame  $n$  des deux classes, comme suit :

$$D_{n,T} = \begin{pmatrix} D_{1,n} \\ D_{2,n} \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

$D_{1,n}$  et  $D_{2,n}$  représentent les départs pendant la trame  $n$  des classes 1 et 2 respectivement et vérifient la condition suivante :

$$D_{1,n} + D_{2,n} \leq C \quad (5.11)$$

On calcule  $D_{2,n}$  pour 4 différentes conditions comme le montre le tableau B.1 en variant  $Y_{2,n}$  qui est le nombre de clients de la classe 2 juste après le départ de la trame  $n - 1$  :

Condition	$Y_{2,n} = 0$	$Y_{2,n} \leq C_0$	$Y_{2,n} > C_0$
$D_{2,n}$	0	$Y_{2,n}$	$C_0$

TABLE 5.1 – Les départs  $D_{2,n}$ .

Alors :

$$D_{2,n} = Y_{2,n} \times (1 - \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)}) + C_0 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} \quad (5.12)$$

Avec  $\mathbf{1}_{(a < X < b)}$  est une fonction indicatrice définit

— par :

$$\mathbf{1}_{(a < X < b)} = \begin{cases} 1 & \text{si } a < X < b \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.13)$$

On calcule maintenant les Départs pendant la trame  $n$  de la classe 1 :  $D_{1,n}$  pour 7 différentes conditions (tableau B.2) en variant  $Y_{1,n}$  qui est le nombre de clients de la classe 1 juste après le départ de la trame  $n - 1$  :

Condition	$Y_{1,n} = 0$	$0 < Y_{1,n} \leq C_1$	$C_1 < Y_{1,n} \leq C_1 + C_0$ et $Y_{2,n} = 0$	$Y_{1,n} > C_1 + C_0$ et $Y_{2,n} = 0$	$C_1 < Y_{1,n} \leq C - Y_{2,n}$ et $Y_{2,n} \leq C_0$	$Y_{1,n} > C - Y_{2,n}$ et $Y_{2,n} \leq C_0$	$Y_{1,n} > C_1$ et $Y_{2,n} > C_0$
$D_{1,n}$	0	$Y_{1,n}$	$Y_{1,n}$	$C_1 + C_0$	$Y_{1,n}$	$C - Y_{2,n}$	$C_1$

TABLE 5.2 – Les départs  $D_{1,n}$ .

Alors :

$$\begin{aligned} D_{1,n} &= Y_{1,n} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} \leq C_1)} + Y_{1,n} \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n}=0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,n} \leq C_1 + C_0)} \\ &+ (C_0 + C_1) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n}=0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} > C_1 + C_0)} \\ &+ Y_{1,n} \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,n} \leq C - Y_{2,n})} \\ &+ (C - Y_{2,n}) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} > C - Y_{2,n})} + C_1 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} > C_1)} \end{aligned}$$

La distribution de probabilité du nombre de slots de la classe 2 juste après le départ d'une trame générique  $n$  est insensible à la présence de la classe 1 dans le système (la distribution de probabilité de la classe 2 ne dépend pas de celle la classe 1).

### Calcul du nombre moyen de clients dans le système

Sous la condition de stabilité du réseau de file d'attente  $\rho < 1$ .

On a :

$$\begin{aligned} Y_{n+1} &= Y_n - D_{n,T} + A_{n,T} \\ \begin{pmatrix} Y_{1,n+1} \\ Y_{2,n+1} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} Y_{1,n} \\ Y_{2,n} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} D_{1,n} \\ D_{2,n} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_{1,n} \\ A_{2,n} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} Y_{1,n+1} \\ Y_{2,n+1} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} Y_{1,n} - D_{1,n} + A_{1,n} \\ Y_{2,n} - D_{2,n} + A_{2,n} \end{pmatrix} \end{aligned}$$



Nous procédons au calcul de la distribution de probabilité du nombre de clients dans le système. On a une chaîne markov à 2 dimensions et la distribution de probabilité du nombre de clients dans le système est à 2 dimensions. Elle s'obtient avec la technique de la fonction génératrice qui sera à 2 variables  $(z_1, z_2)$ . Cette fonction génératrice n'est pas à forme produit. Nous allons alors chercher à calculer le nombre moyen de clients dans le système. Pour ce faire, nous allons passer par les moyennes des carrés, selon la formule de Pollaszek-Khintchine  $\lim_{n \rightarrow \infty} E [Y_{n+1}^T Y_{n+1}]$  : On a

$$\begin{aligned} E [Y_{n+1}^T Y_{n+1}] &= E [Y_{1,n+1}^2] + E [Y_{2,n+1}^2] = E [A_{1,n}^2] + E [D_{1,n}^2] + E [Y_{1,n}^2] - 2E [D_{1,n}Y_{1,n}] \\ &\quad - 2E [D_{1,n}A_{1,n}] + 2E [A_{1,n}Y_{1,n}] + E [A_{2,n}^2] \\ &\quad + E [D_{2,n}^2] + E [Y_{2,n}^2] + 2E [A_{n,T}^2] E [Y_n^2] \\ &\quad - 2E [D_{2,n}Y_{2,n}] - 2E [D_{2,n}A_{2,n}] \end{aligned}$$

Nous avons calculé dans l'annexe C les différents termes de l'équation ci-dessus. Nous avons obtenu alors l'expression suivante :

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} E [Y_{n+1}^T Y_{n+1}] &= E [Y_{1,T}^2] + E [Y_{2,T}^2] = \lim_{n \rightarrow \infty} E [A_{1,n}^2] + \lim_{n \rightarrow \infty} E [D_{1,n}^2] \\ &\quad + \lim_{n \rightarrow \infty} E [Y_{1,n}^2] - 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E [D_{1,n}Y_{1,n}] \\ &\quad - 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E [D_{1,n}] \lim_{n \rightarrow \infty} E [A_{1,n}] \\ &\quad + 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E [A_{1,n}] \lim_{n \rightarrow \infty} E [Y_{1,n}] \\ &\quad + \lim_{n \rightarrow \infty} E [A_{2,n}^2] + \lim_{n \rightarrow \infty} E [D_{2,n}^2] \\ &\quad + \lim_{n \rightarrow \infty} E [Y_{2,n}^2] + 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E [A_{n,T}^2] \lim_{n \rightarrow \infty} E [Y_n^2] \\ &\quad - 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E [D_{2,n}Y_{2,n}] - 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E [D_{2,n}] \lim_{n \rightarrow \infty} E [A_{2,n}] \end{aligned}$$

Donc

$$\begin{aligned}
0 = & \lambda_1 T(m_1 p_1(1 - p_1) + (m_1 p_1)^2) + (\lambda_1 T m_1 p_1)^2 E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} \leq C_1)}] \\
& + E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T}=0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C_1 + C_0)}] + (C_0 + C_1)^2 \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T}=0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1 + C_0)}] \\
& + E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(0 < Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C_1 - Y_{2,T})}] + E[(C - Y_{2,T})^2 \times \mathbf{1}_{(0 < Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C - Y_{2,T})}] \\
& + C_1^2 \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1)}] - 2 \times E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} \leq C_1)}] \\
& + E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T}=0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C_1 + C_0)}] + (C_0 + C_1) \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq 0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1 + C_0)} \times Y_{1,T}] \\
& + E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(0 < Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C_1 - Y_{2,T})}] + (C - Y_{2,T}) \times \mathbf{1}_{(0 < Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C - Y_{2,T})} \times Y_{1,T}] \\
& + C_1 \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1)} \times Y_{1,T}] - 2 \times (E[Y_{1,T} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} \leq C_1)}]) \\
& + E[Y_{1,T} \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq 0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C_1 + C_0)}] \\
& + (C_0 + C_1) \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq 0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1 + C_0)}] + E[Y_{1,T} \times \mathbf{1}_{(0 < Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C_1 - Y_{2,T})}] \\
& + E[(C - Y_{2,T}) \times \mathbf{1}_{(0 < Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C - Y_{2,T})}] \\
& + C_1 \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1)}]) \times \lambda_1 T m_1 p_1 + 2 \times \lambda_1 T m_1 p_1 \times E[Y_{1,T}] \\
& + \lambda_2 T(m_2 p_2(1 - p_2) + (m_2 p_2)^2) + (\lambda_2 T m_2 p_2)^2 + E[Y_{2,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq C_0)}] \\
& + C_0^2 \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)}] + 2 \times \lambda_2 T m_2 p_2 \times E[Y_{2,T}] - 2(E[Y_{2,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq C_0)}]) \\
& + C_0 \times E[(Y_{2,T}) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)}]) - 2 \times (E[Y_{2,T} \times (\mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq C_0)})]) \\
& + (C_0) \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)}]) \times \lambda_2 T m_2 p_2
\end{aligned}$$

On obtient une équation compliquée à résoudre. L'ordonnanceur de priorité fait que la classe 1 apparaît transparente à la classe 2 (en dehors de  $C_1$ ). On se focalise alors à l'étude analytique de la classe critique (Qos) qui sera l'objet du chapitre suivant. On représente dans la section suivante les résultats de la simulation du système incluant les deux classes.

## 5.3 Simulation du système à deux classes et résultats

### 5.3.1 Paramètres de simulation

Pour étudier la sensibilité du système face à la variation des lois statistiques des temps inter-arrivées, on étudie à charge égale le système avec des inter-arrivées à coefficient de variation de 0.5, 1 et 2 à savoir : un coefficient de 0.5 pour une distribution d'Erlang d'ordre 2, un coefficient de 2 pour une distribution hyper-exponentielle d'ordre 2 et un coefficient de 1 pour la distribution exponentielle de référence (arrivées Poisson). La description de ces lois arrivées est détaillée dans l'annexe D. Nous supposons avoir une bande de 10 MHz dans la bande de fréquence de la 5G (<6GHz). 50 slots peuvent être exploitées avec un espacement de 15khz.

C'est la première numérologie de la 5G. 1 slot (1ms) transporte 168 symboles (14 symboles \* 12 bandes). Nous supposons avoir un Modulation and Coding Scheme (MCS)  $\leq 10$  avec un nombre de bits par symbole ( $N_{bps}$ ) = 2. Un slot contient 168 symboles donc pour  $N_{bps} = 2$  on a  $168 * 2 = 336bits$ . On suppose que la classe 1 envoie des paquets de taille maximale égale à 2000 octets et la classe 2 envoie des paquets de taille maximale égale à 800 octets. Pour classe 1, on a  $m_1=2000$  octets = 16000 bits et  $p_1=0.6$ . Pour classe 2 (classe prioritaire), on a  $m_2=800$  octets = 6400 bits et  $p_2= 0.4$ . Pour la classe 1 (streaming), un message de taille 2000 octets peut être envoyé selon notre configuration au maximum en 48 slots. Pour la classe 2 (URLLC), un message de taille 800 octets peut être envoyé selon notre configuration au maximum en 20 slots. Donc en termes de slots, on a  $m_2=20$  (slots) et  $p_2= 0.4$  (plus de petits paquets) et  $m_1=48$  (slots) et  $p_1= 0.6$  (plus de grands paquets). La capacité du réseau est donnée comme  $C = 500slots$ , suivant la première numérologie du NR 5G. La valeur du pourcentage des pourcentage des slots garantis pour la classe 1 est fixée à  $10\%C$ . Ainsi,  $C_1$  est fixé à 50 slots. Le facteur de charge  $\rho$  est fixé à 50%. On suppose 3 scénarios avec différentes valeurs de  $\rho_2$  et  $\rho_1$ . Les intensités de Poisson composées  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont déterminées à partir de  $\rho_1$  et  $\rho_2$  respectivement. Le tableau 5.3 illustre ces paramètres.

Paramètres	Valeurs
Capacité $C$	500 slots
Capacité $C_1$	50 slots
Capacité $C_0$	450 slots
La charge du système $\rho$	0.5
$(\rho_1, \rho_2) \Rightarrow (\lambda_1, \lambda_2)$ (demandes/trame) avec $\rho = \rho_1 + \rho_2$ ; $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>— <math>(\rho_1=0.94\rho, \rho_2=0.06\rho) \Rightarrow (\lambda_1=8.159722222, \lambda_2=1.875)</math> ;</li> <li>— <math>(\rho_1=0.8\rho, \rho_2=0.2\rho) \Rightarrow (\lambda_1=6.944444444, \lambda_2=6.25)</math> ;</li> <li>— <math>(\rho_1=0.7\rho, \rho_2=0.3\rho) \Rightarrow (\lambda_1=6.076388889, \lambda_2=9.375)</math></li> </ul>
$(m_1, p_1)$	(48, 0.6)
$(m_2, p_2)$	(20, 0.4)
Modulation and coding scheme (MCS)	$\leq 10$
Numérologie 5G	1ère numérologie (espacement de 15KHz)

TABLE 5.3 – Paramètres de simulation

### 5.3.2 Paramètres de performances étudiés

Dans cette section, nous décrivons les paramètres de performances étudiés. Ces paramètres sont :

- Distribution de probabilité du nombre de clients dans le système en RBs : c'est la probabilité d'occurrence du nombre de clients en termes de RBs dans le système (pour chaque trame). Elle permet de vérifier la stabilité du système.
- Distribution de probabilité du délai : C'est la probabilité d'occurrence du délai dans le système. Le délai correspond au temps de séjour des clients dans le système (pour chaque trame). C'est la somme du temps de service avec le temps d'attente.
- Délai moyen : c'est le temps de séjour moyen d'une client (slot) dans le système

### 5.3.3 Résultats de simulation

#### Généralisation des lois d'arrivées au-delà du Poisson

Nous avons évalué par simulation notre système en considérant les lois d'arrivées plus générales que le Poisson à savoir : une distribution d'Erlang d'ordre 2 (coefficient de variation inférieur à 1) , une distribution Hyper-exponentielle (choix aléatoire entre deux exponentielles et coefficient de variation supérieur à 1), en comparaison avec la distribution inter-arrivées exponentielle (coefficient de variation égale à 1) du Poisson.

La figure 5.2, montre une certaine insensibilité des performances du système en termes de délai par rapport à la variabilité du coefficient de variation. Ce résultat paraît remarquable et un peu inattendu. En effet, il est connu que dans les systèmes d'attente généraux (de type GI/GI/1 par exemple) les performances ont tendance à se dégrader quand le coefficient de variation augmente et, inversement, s'améliorer quand le coefficient de variation diminue. Bien entendu, nous sommes ici dans le cadre d'un modèle d'attente à temps discret et multi-serveur avec un service unitaire constant pour un slot, le service de la trame étant variable et lié au nombre de slots compris dans la trame.

En tout cas, ce résultat obtenu mérite d'être confirmé avec des simulations fines sur une large plage de variation du coefficient de variation entre 0 et 1 d'une part et au delà de 1 d'autre part. Si ce résultat se confirme cela veut dire qu'on peut dimensionner le système avec un processus d'arrivée de type Poisson pour lequel on a des résultats analytiques précis (comme on le verra dans le chapitre suivant). De plus, comme le processus de Poisson est entièrement déterminé par un seul paramètre (son intensité) il est facile à caractériser (par inférence statistique) à partir de mesures réelles. En revanche, l'hyper-exponentielle ou la loi d'Erlang d'ordre  $\geq 2$  sont plus compliquées à caractériser car ces distributions requièrent la détermination de plusieurs paramètres statistiques à savoir : deux au minimum pour la distribution d'Erlang et quatre au minimum pour la distribution hyper-

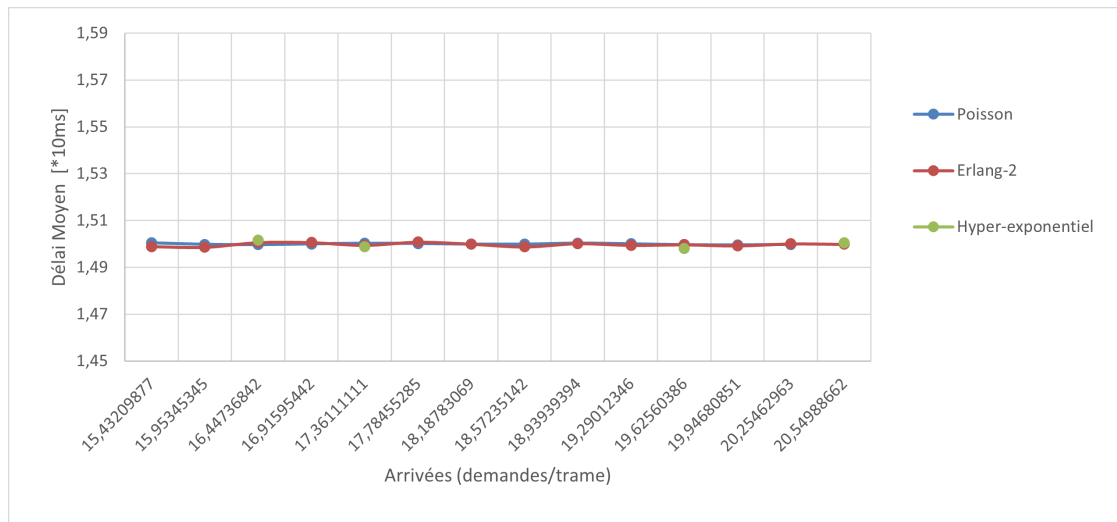


FIGURE 5.2 – Variation du délai de la classe 1 en fonction des lois d'arrivées

exponentielle. On trouve également ce résultat pour la classe 2 comme le montre la figure 5.3.

### Variation du nombre de clients dans le système en slots

Nous avons simulé notre système pour 3 scénarios avec variation de  $\rho_2$  par rapport à  $\rho = 0.5$ .

– Premier scénario :  $\rho_2 = 0.06\rho$

La figure 5.4 montre que la plus grande probabilité d'occurrence des demandes de la classe 1 se focalise principalement pour un nombre de clients au alentour de 200 clients de classe 1. Les probabilités pour un nombre de clients entre 300 et 400 n'est pas négligeable vu la valeur importante de  $\rho_1$  par rapport à  $\rho_2$ . La figure 5.5 montre que la plus grande probabilité d'occurrence des demandes de la classe 2 se focalise principalement pour un nombre de clients entre 0 et 40 clients cela est du au fait qu'on a une faible valeur de  $\rho_2$ .

– Deuxième scénario :  $\rho_2 = 0.2\rho$

La figure 5.6 montre que la plus grande probabilité d'occurrence des demandes de la classe 1 se focalise principalement pour un nombre de clients au alentour de 170 clients de classe 1. La figure 5.7 montre que la plus grande probabilité d'occurrence des demandes de la classe 2 se focalise principalement pour un nombre de clients au alentour de 50 clients de classe 2.

– Troisième scénario :  $\rho_2 = 0.3\rho$

La figure 5.8 montre que la plus grande probabilité d'occurrence des demandes de

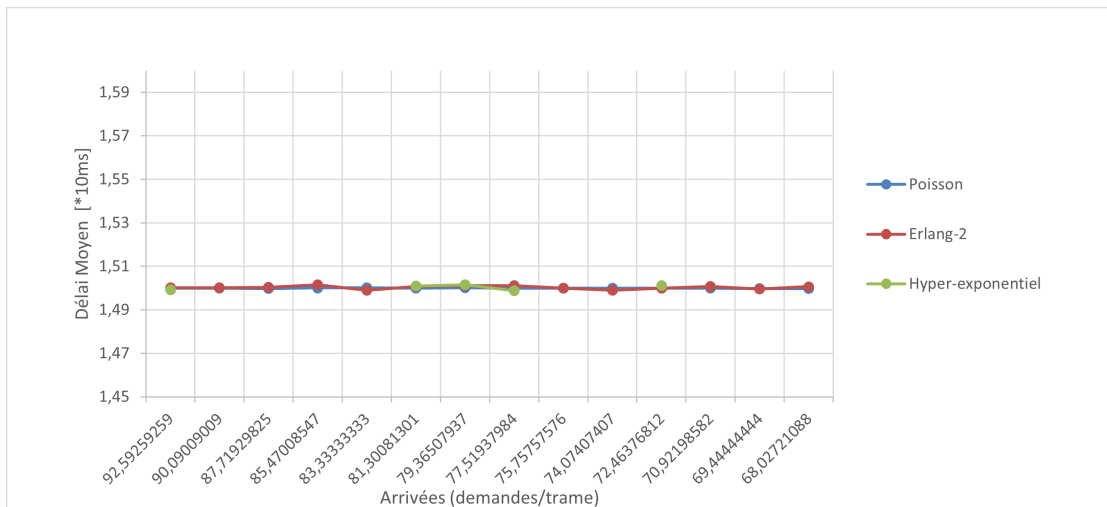


FIGURE 5.3 – Variation du délai de la classe 2 en fonction des lois d’arrivées

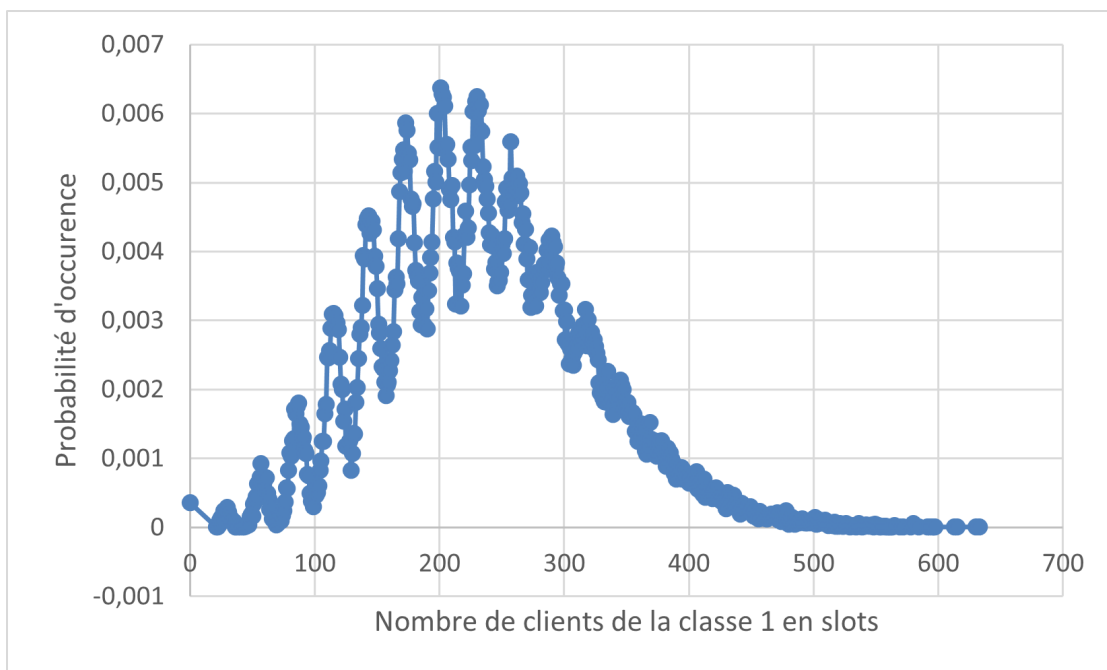


FIGURE 5.4 – Distribution de probabilité du nombre de clients de la classe 1 en slots avec  $\rho_2=0.06\rho$

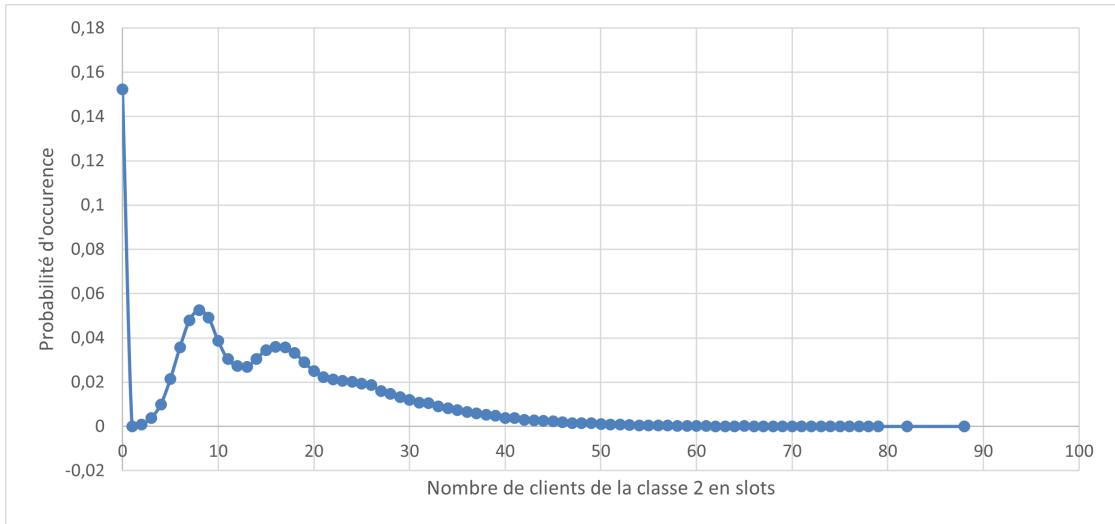


FIGURE 5.5 – Distribution de probabilité de nombre de clients de la classe 2 en slots  $\rho_2=0.06\rho$

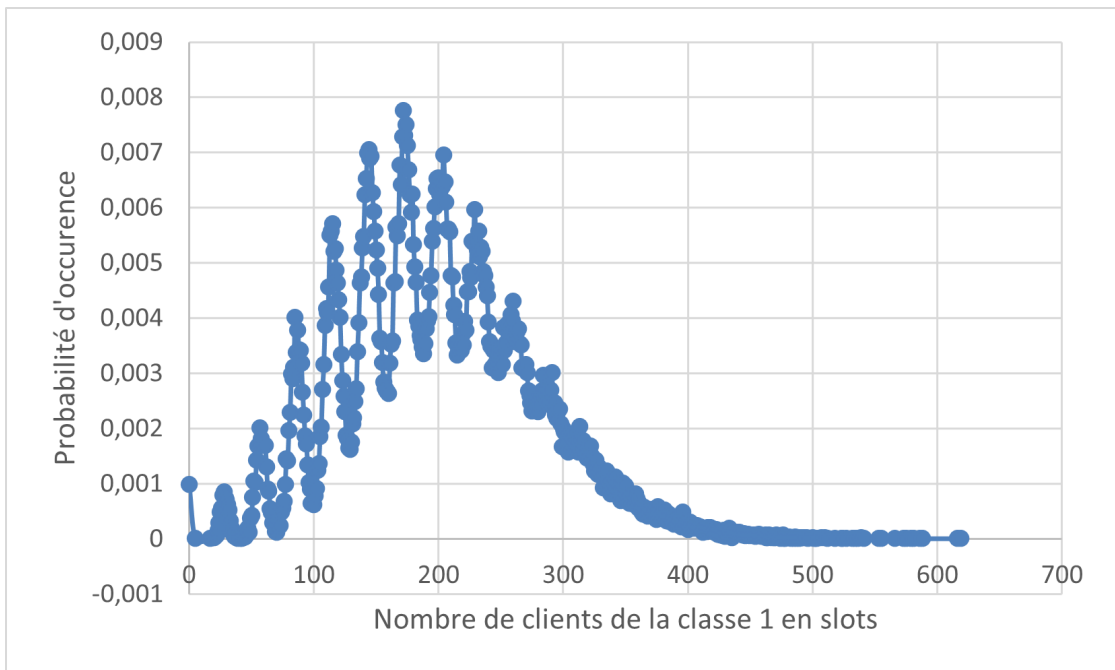


FIGURE 5.6 – Distribution de probabilité du nombre de clients de la classe 1 en slots  $\rho_2=0.2\rho$

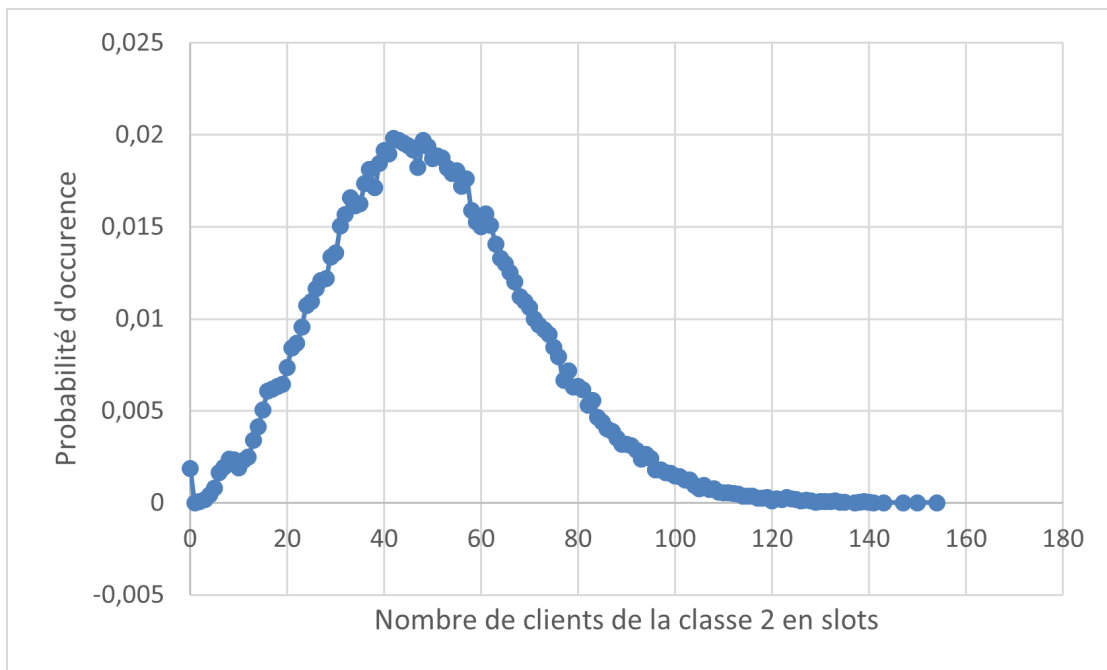


FIGURE 5.7 – Distribution de probabilité de nombre de clients de la classe 2 en slots  $\rho_2=0.2\rho$



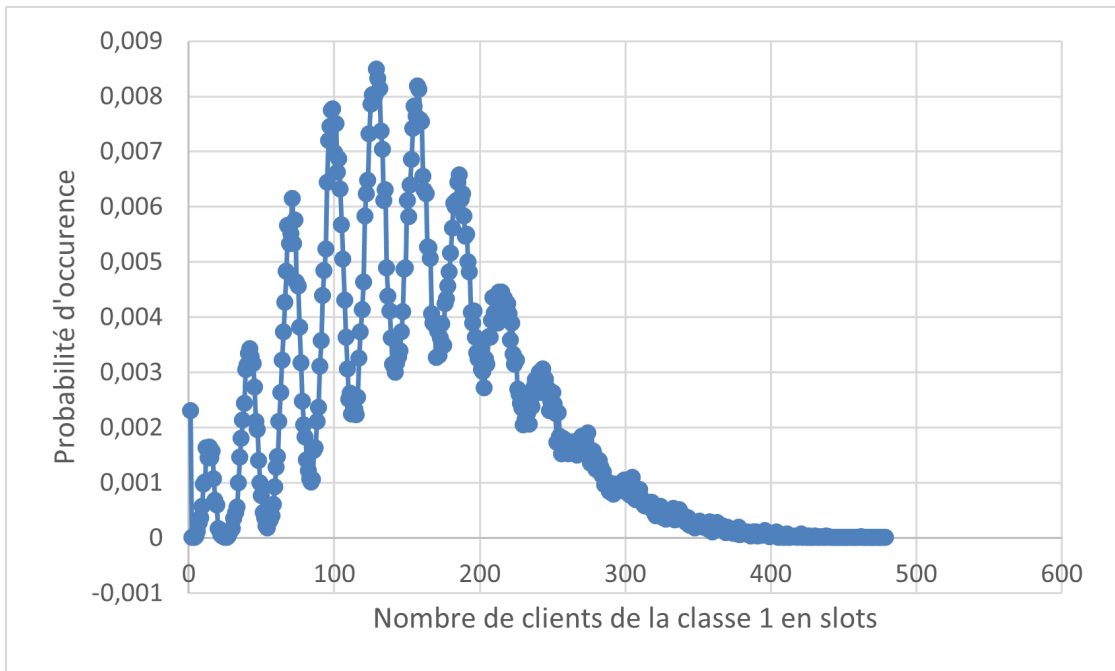


FIGURE 5.8 – Distribution de probabilité du nombre de clients de la classe 1 en slots  $\rho_2=0.3\rho$

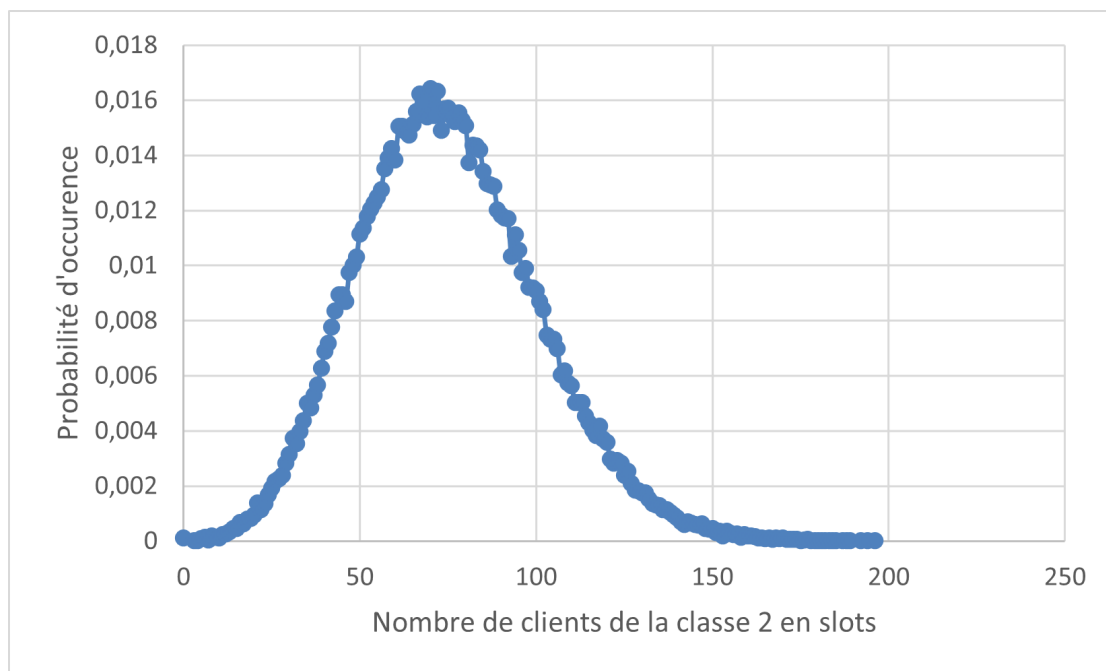


FIGURE 5.9 – Distribution de probabilité de nombre de clients de la classe 2 en slots  $\rho_2=0.3\rho$

la classe 1 se focalise principalement pour un nombre de clients au alentour de 130 clients de classe 1. La figure 5.9 montre que la plus grande probabilité d'occurrence des demandes de la classe 2 se focalise principalement pour un nombre de clients au alentour de 70 clients de classe 2. les probabilités s'étalent jusqu'au 200 clients.

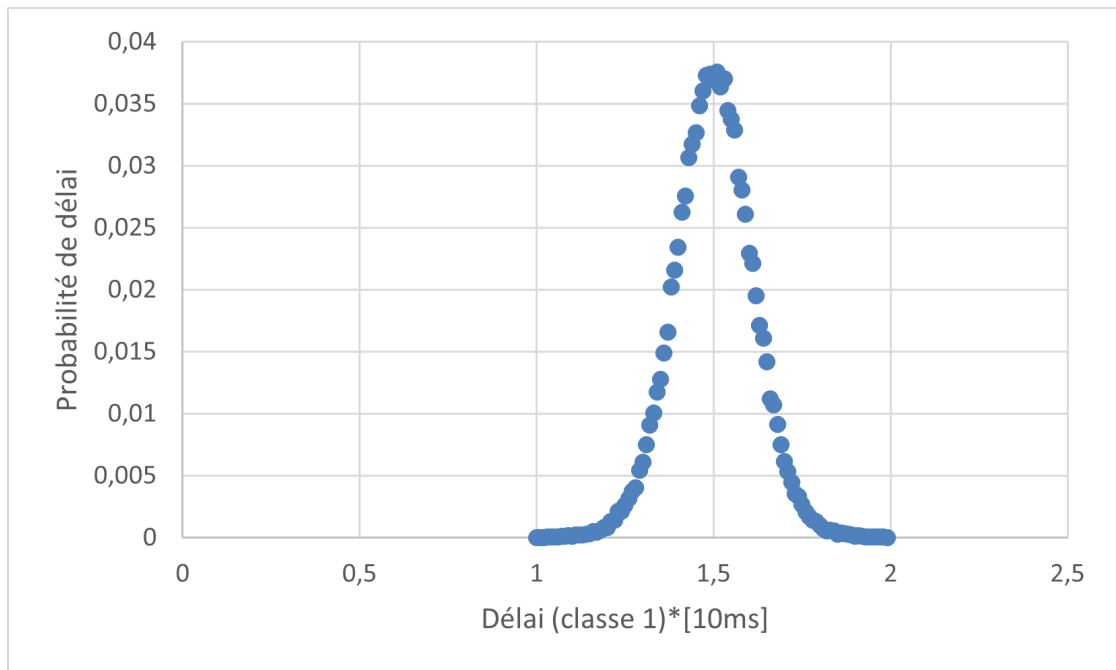
### Variation des Délais

– Premier scénario :  $\rho_2 = 0.06$

La figure 5.10 montre la distribution de probabilité du délai durant la simulation pour la classe 1. On constate que la valeur de délai égale à 15 ms (durée d'une trame et demi) a la plus grande occurrence parmi les autres valeurs de délais. La figure 5.11 montre la distribution de probabilité du délai durant la simulation pour la classe 2. On constate également que la valeur de délai égale à 15 ms (durée d'une trame et demi) a la plus grande occurrence parmi les autres valeurs de délais. \*

– Deuxième scénario :  $\rho_2 = 0.2\rho$

La figure 5.12 montre la distribution de probabilité du délai durant la simulation pour la classe 1. On constate que la valeur de délai égale à 15 ms (durée d'une

FIGURE 5.10 – Distribution de probabilité du délai de la classe 1  $\rho_2=0.06\rho$ 

trame et demi) a la plus grande occurrence parmi les autres valeurs de délais.

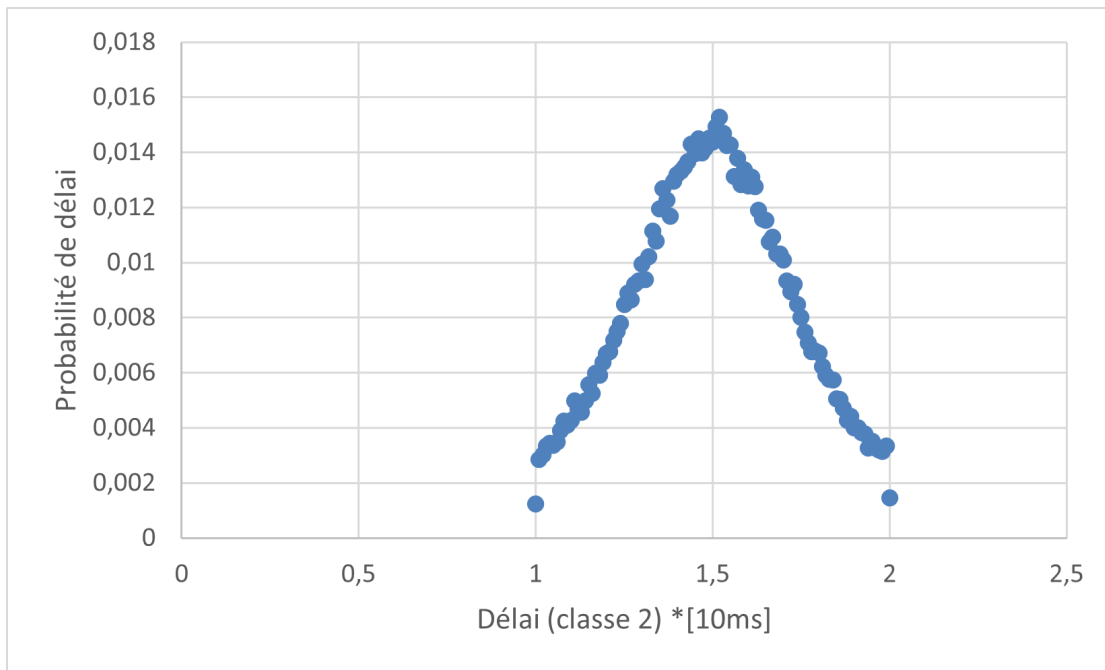


FIGURE 5.11 – Distribution de probabilité du délai de la classe 2  $\rho_2=0.06\rho$

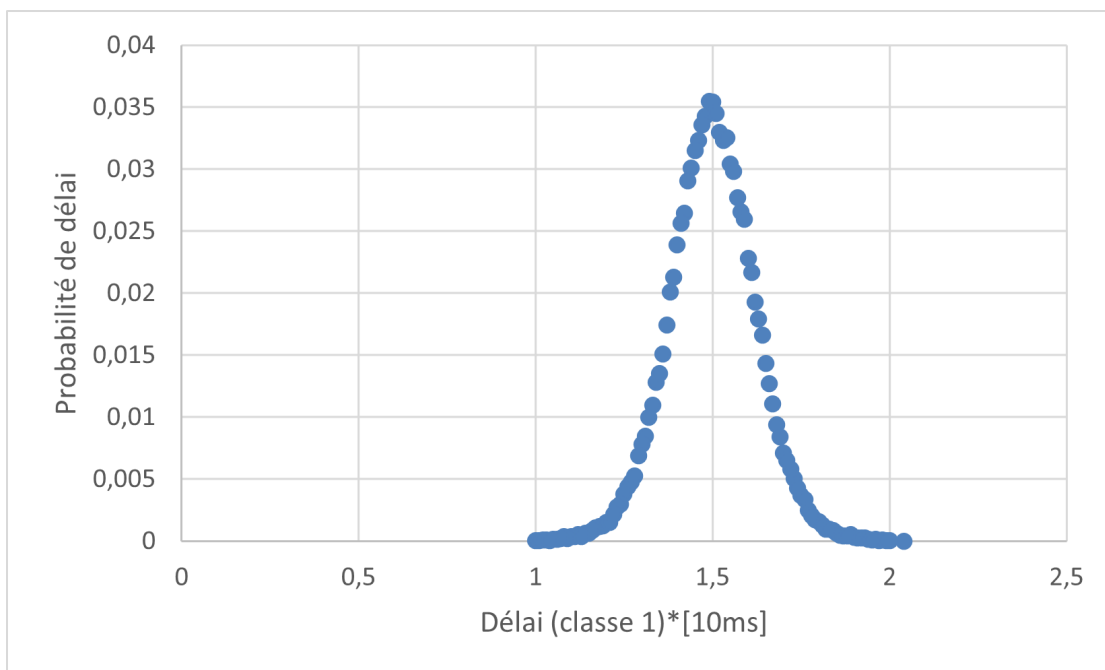


FIGURE 5.12 – Distribution de probabilité du délai de la classe 1  $\rho_2=0.2\rho$

La figure 5.13 montre la distribution de probabilité du délai durant la simulation pour la classe 2. On constate également que la valeur de délai égale à 15 ms (durée d'une trame et demi) conserve la plus grande occurrence parmi les autres valeurs de délais.

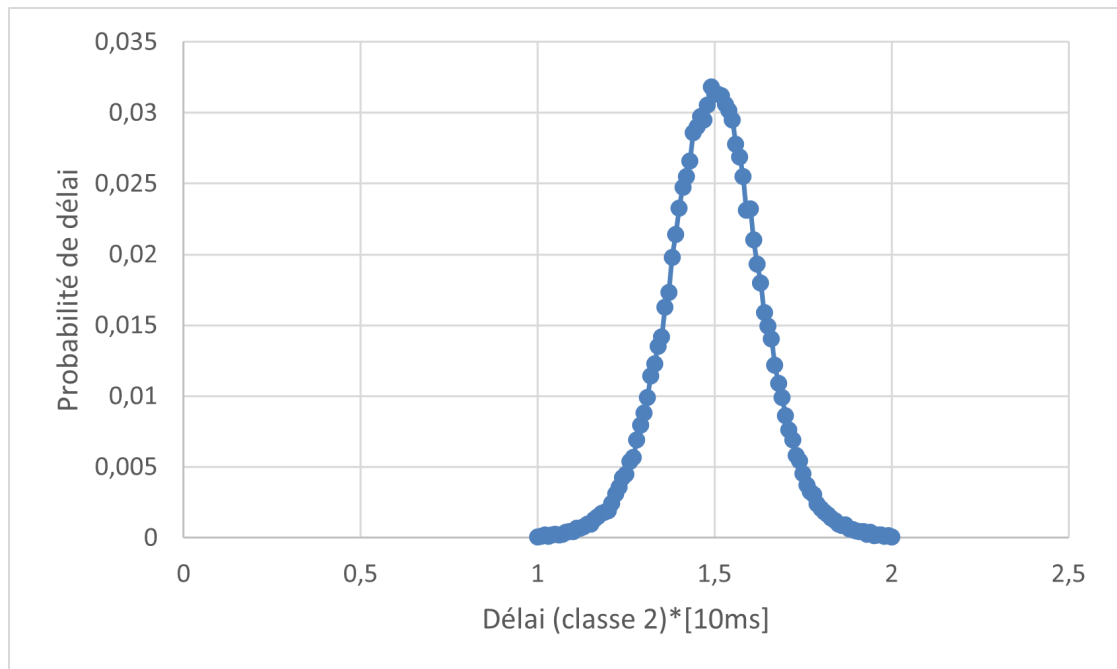


FIGURE 5.13 – Distribution de probabilité du délai de la classe 2  $\rho_2=0.2\rho$

– Troisième scénario :  $\rho_2 = 0.3$

La figure 5.14 montre la distribution de probabilité du délai durant la simulation pour la classe 1. On constate que la valeur de délai égale à une durée d'une trame et demi a la plus grande occurrence parmi les autres valeurs de délais.

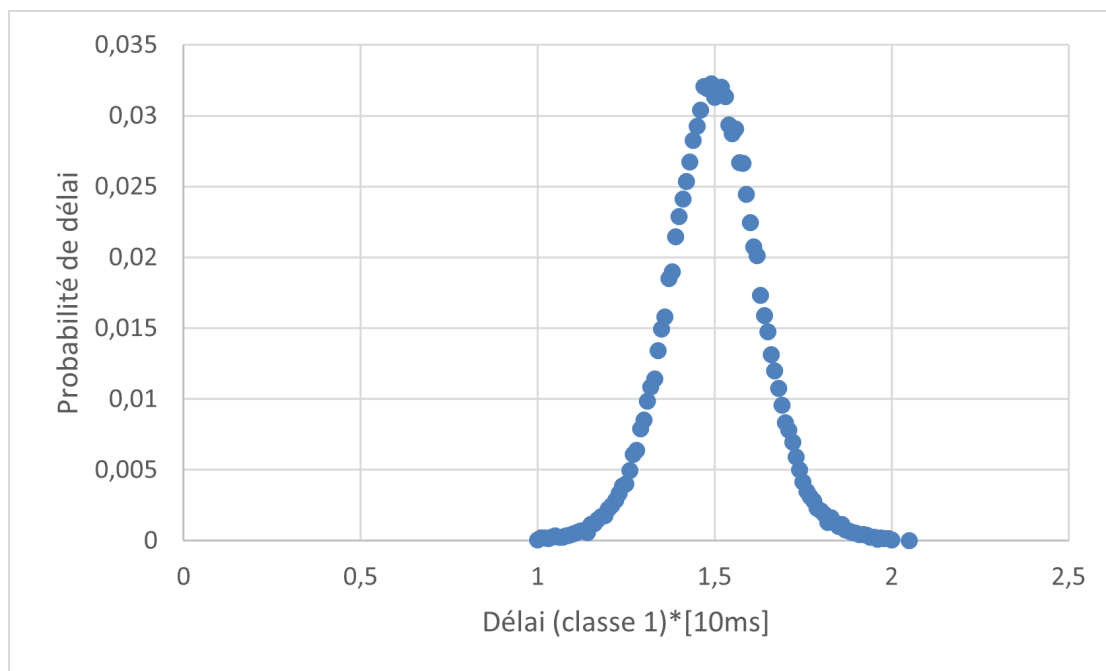
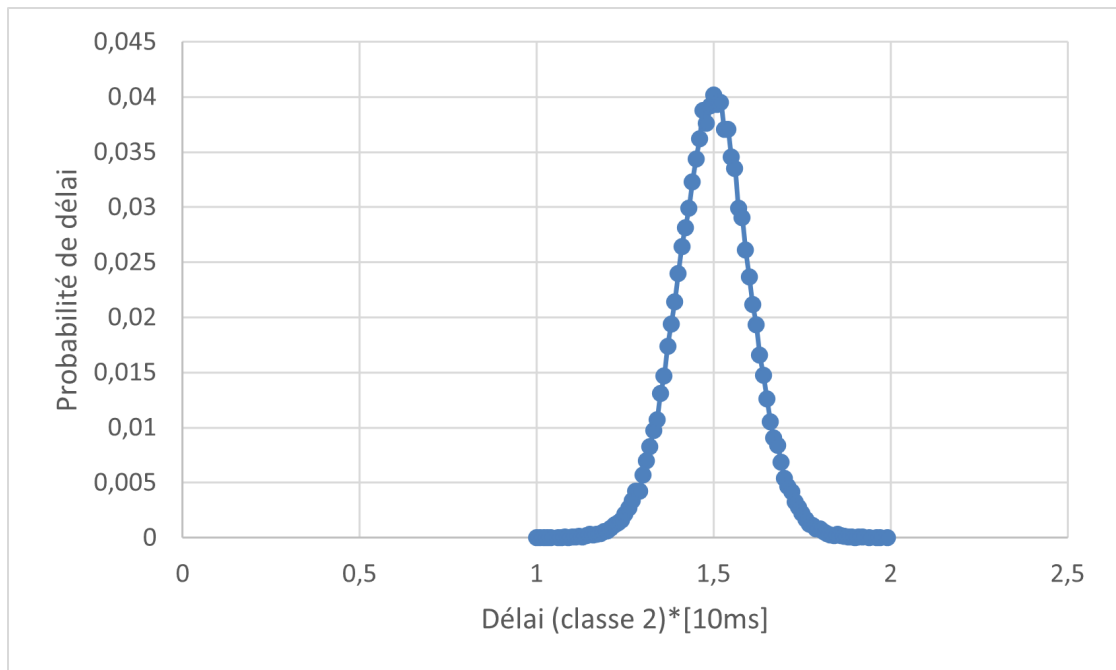


FIGURE 5.14 – Distribution de probabilité du délai de la classe 1  $\rho_2=0.3\rho$

La figure 5.15 montre la distribution de probabilité du délai durant la simulation pour la classe 2. On constate également que en augmentant  $\rho_2$ , la valeur de délai égale à 15 ms (durée d'une trame et demi) a toujours la plus grande occurrence parmi les autres valeurs de délais.

FIGURE 5.15 – Distribution de probabilité du délai de la classe 2  $\rho_2=0.3\rho$ 

### Variation du délai moyen

Dans cette partie, nous calculons les différentes valeurs du délai moyen en variant les valeurs de  $\rho_2$  selon les différents scénarios étudiés. La figure 5.16 montre les délais moyens de la classe 1 et la classe 2 respectivement en fonction des arrivées de la classe 2 autrement dit en fonction de  $\rho_2$  ( $\rho_2=0.06\rho, \rho_2=0.2\rho, \rho_2=0.3\rho$ ) tout en gardant le facteur de charge égal à 50%. On constate que les délais moyens des deux classes sont aux alentours d'une trame et demi pour les différentes valeurs de  $\rho_2$  (il n'y a pas d'attente au delà de l'attente résiduelle moyenne). Prenons l'exemple pour  $(\lambda_1=1.875, \rho_2=0.06)$ , on a le délai moyen de la classe 1 est égal à 15.009 ms et le délai moyen de la classe 2 est égal à 14.991 comme le montre la figure 5.16.

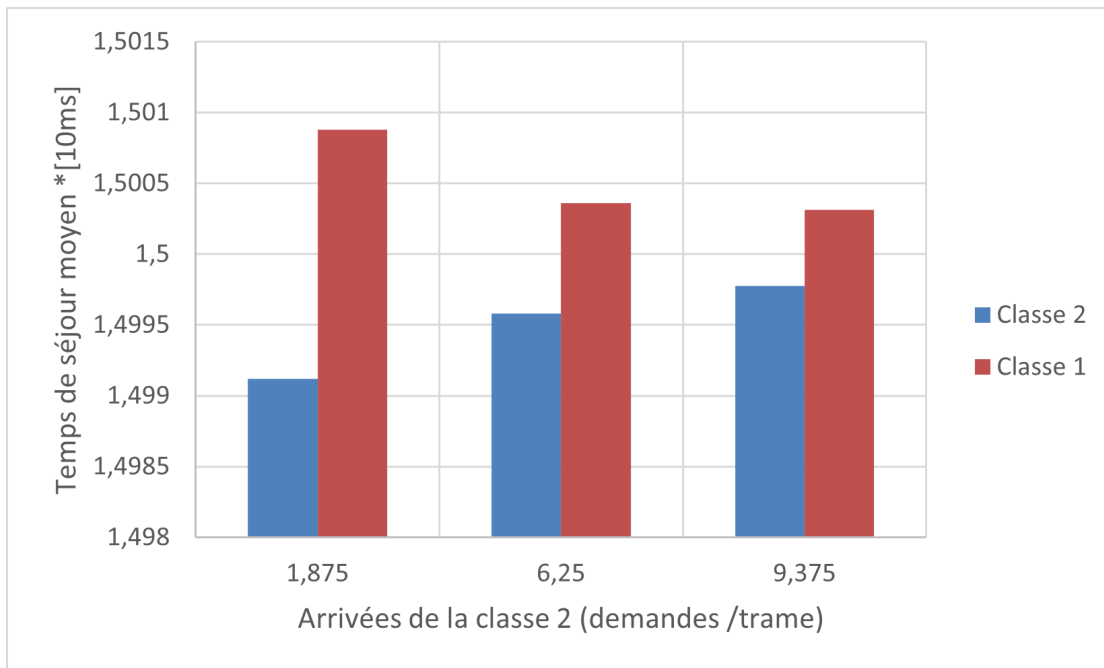


FIGURE 5.16 – Délai moyen en fonction des arrivées de la classe 2

## 5.4 Conclusion

Nous avons détaillé dans ce chapitre l'algorithme proposé ainsi que le modèle analytique adopté. Nous avons constaté l'existence d'une chaîne de Markov dans notre système étudié. Nous avons évalué par simulation les paramètres de performances (distribution de probabilité de nombre de clients dans le système, distribution de probabilité du délai et le délai moyen) pour les deux classes (critique et moins critique).

Nous nous intéressons dans le chapitre prochain à l'étude de la chaîne de Markov trace (classe 2 uniquement) déduit de la chaîne de Markov globale du système.





# Chapitre 6

## Modèle analytique de la classe critique

### 6.1 Introduction

Nous allons étudier dans cette section plus particulièrement la classe 2 temps réel critique qui porte les flux URLLC. Cette classe est modélisée par la chaîne de Markov trace qui est obtenue à partir de la chaîne de Markov principale du nombre de clients dans le système.

En effet, si on se limite à l'analyse de l'évolution de la classe 2 dans le système on a dans ce cas la relation suivante :

$$Y_{2,n+1} = Y_{2,n} - D_{2,n} + A_{2,n}$$

Cette équation d'évolution montre que la classe 1 est transparente à la classe 2 d'une part et qu'il s'agit bien d'une chaîne de Markov. En effet, si on suppose que le présent  $Y_{2,n}$  est connu, alors le nombre de départ de la classe 2 dans la trame qui suit  $D_{2,n}$  sera connu et donc sera indépendant du passé avant le présent  $n$ . Enfin comme le nombre d'arrivées  $A_{2,n}$  du Poisson composé de la classe 2 dans la trame  $n$  est indépendant du passé avant  $n$  alors tout le second membre  $Y_{2,n} - D_{2,n} + A_{2,n}$  devient indépendant du passé ce qui montre que le futur  $Y_{2,n+1}$  est également indépendant du passé conditionnellement à la connaissance du présent  $Y_{2,n}$ . Cela

montre que  $Y_2$  est une chaîne de Markov.

$$\begin{aligned} D_{2,n} &= Y_{2,n} \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} \leq C_0)} + C_0 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} \\ D_{2,n} &= Y_{2,n} \times (1 - \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)}) + C_0 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} \\ D_{2,n} &= Y_{2,n} - Y_{2,n} \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} + C_0 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} \\ D_{2,n} &= Y_{2,n} + (C_0 - Y_{2,n}) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} \end{aligned}$$

Donc

$$\begin{aligned} Y_{2,n+1} &= Y_{2,n} - Y_{2,n} - (C_0 - Y_{2,n}) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} + A_{2,n} \\ Y_{2,n+1} &= (Y_{2,n} - C_0) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} + A_{2,n} \end{aligned}$$

## 6.2 Calcul de la distribution du nombre de clients dans le système en régime stationnaire aux instants de départ

Soit :

$$Q_{2,n}(z) = E [z^{Y_{2,n}}] = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{P} \{Y_{2,n} = k\} z^k$$

et

$$Q_{2,n+1}(z) = E [z^{Y_{2,n+1}}] = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{P} \{Y_{2,n+1} = k\} z^k$$

la fonction génératrice du nombre de clients dans le système à l'instant de départ de la trame  $n$ .

Ces fonctions génératrices sont définies dans le disque unité du plan complexe avec  $z$  de module strictement inférieur à 1. Ainsi définie la fonction génératrice est absolument convergente avec comme module (complexe) majoré par la somme de toutes les probabilités qui, dans le cas d'une chaîne de Markov ergodique, est égal à l'unité puisque dans ce cas la chaîne de Markov possède une distribution de probabilité non dégénérée strictement positive et unique à une constante multiplicative près [84] [85]. Cette convergence absolue à l'intérieur du disque unité rend la fonction génératrice holomorphe et donc indéfiniment dérivable avec ses dérivées également holomorphes. A l'intérieur du disque unité, la fonction génératrice en

## 6.2. CALCUL DE LA DISTRIBUTION DU NOMBRE DE CLIENTS DANS LE SYSTÈME EN RÉGIME

tant que série (de Taylor à coefficients réels) est holomorphe partout et ne doit donc pas avoir de pôle (donc ne doit pas diverger) partout à l'intérieur du disque. En revanche, elle peut avoir des pôles sur la frontière du disque  $\{z; z = 1\}$ . Bien entendu, la fonction génératrice n'est pas définie dans le plan complexe à l'extérieur du disque unité. Ce disque unité est en réalité le disque de convergence de la fonction génératrice complexe en tant que série de Taylor.

La distribution du nombre de clients dans le système en régime stationnaire aux instants de départ s'obtient en faisant tendre  $n$  vers l'infini

$$\lim_{n \rightarrow \infty} Q_{2,n+1}(z) = Q(z) = \lim_{n \rightarrow \infty} E [z^{Y_{2,n+1}}] = E [z^{Y_2}]$$

On part de l'expression

$$Y_{2,n+1} = (Y_{2,n} - C_0) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} + A_{2,n}$$

$$Y_{2,n+1} = (Y_{2,n} - C_0) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} + A_{2,n}$$

Sachant que  $A_{2,n}$  est indépendant de l'état du système, la fonction génératrice se factorise ainsi :

$$Q_{2,n+1}(z) = E [z^{(Y_{2,n} - C_0) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)}}] E [z^{A_{2,n}}]$$

Calculons  $E [z^{A_{2,n}}]$  :

On a la fonction génératrice d'une variable aléatoire discrète

$$G_X(z) \stackrel{\text{def}}{=} E [z^X] = \sum_{n=0}^{\infty} z^n P\{X = n\}$$

Cas particuliers :

**Distribution binomiale (m,p), avec m est la taille maximale du burst et p (probabilité) varie entre 0 et 1 (0 < p < 1)**

$$P\{X = n\} = \frac{m!}{(m-n)!n!} p^n (1-p)^{m-n}$$

$$0 \leq n \leq m$$

$$G_X(z) = \sum_{n=0}^m z^n p^n (1-p)^{m-n} \frac{m!}{(m-n)!n!}$$

$$G_X(z) = \sum_{n=0}^m \frac{m!}{(m-n)!n!} p^n (1-p)^{m-n} z^n = \sum_{n=0}^m \frac{m!}{(m-n)!n!} (zp)^n (1-p)^{m-n}$$

$$G_X(z) = (zp + (1-p))^m$$

**Distribution de Poisson  $\lambda$  arrivées dans  $T$**

$$P\{X = n\} = \frac{(\lambda T)^n}{n!} e^{-\lambda T}$$

$$G_X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} z^n P\{X = n\}$$

$$G_X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\lambda T z)^n}{n!} e^{-\lambda T}$$

$$G_X(z) = e^{-\lambda T} e^{\lambda T z}$$

$$G_X(z) = e^{\lambda T(z-1)}.$$

Processus composé (discret) :

$$Y = X_1 + X_2 + \dots + X_N$$

$$G_Y(z) = E[z^Y] = E[z^{X_1 + \dots + X_N}] = E_N E[z^{X_1 + \dots + X_N} | N] (*)$$

où  $E[z^{X_1 + \dots + X_N} | N]$  est l'espérance conditionnelle de la variable aléatoire  $z^{X_1 + \dots + X_N}$  par rapport à  $N$  et  $E_N[\cdot]$  est l'espérance de  $[\cdot]$  par rapport à la distribution de  $N$ . L'égalité (\*) est une propriété de l'espérance conditionnelle :

$$G_Y(z) = E[z^{X_1 + \dots + X_N}] = E_N \{E[z^{X_1 + \dots + X_N} | N]\}$$

Or les  $X_j$  sont iid donc la fonction génératrice se factorise :

$$G_Y(z) = E_N \{E[z^{X_1}] \dots E[z^{X_N}]\}$$

$$E_N \left\{ (E[z^{X_1}])^N \right\} = E_N \left[ (G_X(z))^N \right] = \sum_{n=0}^{\infty} (G_X(z))^n P\{N = n\} = G_N(G_X(z))$$

Processus de Poisson  $\lambda$  composé avec une distribution binomiale  $(m,p)$  :  $N$  Poisson et  $X$  binomiale

$$G_N(z) = e^{\lambda T(z-1)} \quad \text{et} \quad G_X(z) = (zp + (1-p))^m$$

## 6.2. CALCUL DE LA DISTRIBUTION DU NOMBRE DE CLIENTS DANS LE SYSTÈME EN RÉGIM

Donc

$$G_N(G_X(z)) = e^{\lambda T(G_X(z)-1)} = e^{\lambda T((zp+(1-p))^m-1)}$$

Comme on va s'intéresser particulièrement à la classe 2 on notera les paramètres de la distribution binômiale par  $(m_2, p_2)$  et le paramètre du processus de Poisson par  $\lambda_2$ . On a donc

$$E[z^{A_{2,n}}] = e^{\lambda_2 T((zp_2+(1-p_2))^{m_2}-1)}$$

A partir de cette fonction génératrice on peut calculer :

$$E[A_{2,n}] = \left. \frac{d}{dz} G_N(G_X(z)) \right|_{z=1} = \lambda_2 T m_2 p_2$$

D'autre part,

$$\begin{aligned} E[z^{(Y_{2,n}-C_0) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n}>C_0)}}] &= \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{P}\{(Y_{2,n}-C_0) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n}>C_0)} = k\} z^k \\ &= \sum_{k=C_0}^{\infty} \mathbf{P}\{Y_{2,n} = k\} z^{k-C_0} E[z^{(Y_{2,n}-C_0) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n}>C_0)}}] \\ &= z^{-C_0} \times \sum_{k=C_0}^{\infty} \mathbf{P}\{Y_{2,n} = k\} z^k E[z^{(Y_{2,n}-C_0) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n}>C_0)}}] \\ &= z^{-C_0} \left( \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{P}\{Y_{2,n} = k\} z^k - \mathbf{P}\{Y_{2,n} = 0\} - \dots - z^{C_0-1} \mathbf{P}\{Y_{2,n} = C_0 - 1\} \right) \\ &= z^{-C_0} \times (E[z^{Y_{2,n}}] - \mathbf{P}\{Y_{2,n} = 0\} - z \mathbf{P}\{Y_{2,n} = 1\} - \dots \\ &\quad - z^{C_0-1} \mathbf{P}\{Y_{2,n} = C_0 - 1\}) \end{aligned}$$

Or,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E[z^{Y_{2,n+1}}] = Q(z) \tag{6.1}$$

Posons  $E_A(z) = \lim_{n \rightarrow \infty} E[z^{A_{2,n}}]$  qui ne dépend pas de n. Donc,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E[z^{Y_{2,n+1}}] = Q(z)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E[z^{Y_{2,n+1}}] = E_A(z) \times \frac{1}{z^{C_0}} (Q(z) - \pi_0 - z\pi_1 - \dots - z^{C_0-1}\pi_{C_0-1})$$

avec

$$\pi_k = \mathbf{P}\{Y_{2,T} = k\}$$

et

$$E_A(z) = E [z^{A_{2,n}}] = e^{\lambda_2 T((zp_2+(1-p_2))^{m_2-1})}$$

D'autre part :

$$Q_{2,n}(z) = E [z^{Y_{2,n}}]$$

Sa dérivée en  $z = 1$  permet de calculer l'espérance de  $Y_{2,n}$  :

$$\frac{d}{dz} Q_n(z) |_{z=1} = E[Y_{2,n}] \quad (6.2)$$

On a :

$$\begin{aligned} Q(z) &= \frac{E_A(z)}{z^{C_0}} (Q(z) - \pi_0 - z\pi_1 - \dots - z^{C_0-1}\pi_{C_0-1}) \\ Q(z) - \frac{Q(z)z^{C_0}}{E_A(z)} &= \sum_{j=0}^{C_0-1} z^j \pi_j \\ Q(z) \left(1 - \frac{z^{C_0}}{E_A(z)}\right) &= \sum_{j=0}^{C_0-1} z^j \pi_j \end{aligned}$$

Ainsi on obtient  $Q(z)$  la fonction génératrice de notre système comme suit :

$$Q(z) = \frac{E_A(z)}{E_A(z) - z^{C_0}} \sum_{j=0}^{C_0-1} z^j \pi_j$$

Avec

$$E_A(z) = e^{\lambda_2 T((zp_2+(1-p_2))^{m_2-1})} \quad (6.3)$$

En remarquant que :

$$E_A(z) |_{z=1} = e^{\lambda_2 T((zp_2+(1-p_2))^{m_2-1})} |_{z=1} = e^{\lambda_2 T((p_2-(1-p_2))^{m_2-1})} = e^{\lambda_2 T^0} = 1$$

Il en découle que le dénominateur de  $Q(z)$  :

$$\{E_A(z) - z^{C_0}\} |_{z=1} = 1 - 1 = 0$$

Donc, en  $z = 1$  comme le numérateur de  $Q(z)$  est non nul et que le dénominateur est nul, alors  $z = 1$  est un pôle de  $Q(z)$  qui est donc situé sur la frontière du disque unité. En ce point, la fonction génératrice de la classe 2 n'est donc plus holomorphe.

## 6.2. CALCUL DE LA DISTRIBUTION DU NOMBRE DE CLIENTS DANS LE SYSTÈME EN RÉGIM

Calculons maintenant la Dérivée de  $Q(z)$  en un point quelconque dans le disque unité.

En posant :

$$Q(z) = \frac{f(z)}{g(z)}$$

et :

$$\frac{d}{dz}Q(z) = Q'(z)$$

En tout point  $z$  où  $Q(z)$  est différentiable on a :

$$Q'(z) = \frac{gf' - fg'}{g^2}(z)$$

$$f'(z) = \frac{d}{dz}[E_A(z) \sum_{j=0}^{C_0-1} z^j \pi_j] = \frac{d}{dz}(E_A(z)) \left( \sum_{j=0}^{C_0-1} z^j \pi_j \right) + E_A(z) \frac{d}{dz} \left( \sum_{j=0}^{C_0-1} z^j \pi_j \right)$$

$$\frac{d}{dz}E_A(z) = \frac{d}{dz}e^{\lambda_2 T((zp_2+(1-p_2))^{m_2-1})} = \lambda_2 T m_2 p_2 z^{m_2-1} e^{\lambda_2 T((zp_2+(1-p_2))^{m_2-1})}$$

$$\frac{d}{dz} \sum_{j=0}^{C_0-1} z^j \pi_j = \sum_{j=0}^{C_0-1} j z^{j-1} \pi_j$$

$$f'(z) = \lambda_2 T m_2 p_2 z^{m_2-1} e^{\lambda_2 T((zp_2+(1-p_2))^{m_2-1})} \sum_{j=0}^{C_0-1} z^j \pi_j + e^{\lambda_2 T((zp_2+(1-p_2))^{m_2-1})} \sum_{j=0}^{C_0-1} j z^{j-1} \pi_j$$

$$g(z) = e^{\lambda_2 T((zp_2+(1-p_2))^{m_2-1})} - z^{C_0}$$

$$g'(z) = \lambda_2 T m_2 p_2 z^{m_2-1} e^{\lambda_2 T((zp_2+(1-p_2))^{m_2-1})} - C_0 z^{C_0-1}$$

En prenant en compte ces équations on obtient :

$$Q'(z) = \frac{(e^{\lambda_2 T((zp_2+(1-p_2))^{m_2-1})} - z^{C_0})f'(z) - f(z)(\lambda_2 T m_2 p_2 z^{m_2-1} e^{\lambda_2 T((zp_2+(1-p_2))^{m_2-1})} - C_0 z^{C_0-1})}{(e^{\lambda_2 T((zp_2+(1-p_2))^{m_2-1})} - z^{C_0})^2}$$

Si on évalue  $Q'(z) |_{z=1}$  comme dans le cas de  $Q(z) |_{z=1}$  on trouve également que le numérateur reste non nul tandis que le dénominateur  $g(z)$  s'annule, ce qui veut dire aussi que  $z = 1$  est une singularité de  $Q'(z)$  et donc que la dérivée de la fonction génératrice n'est pas holomorphe non plus en ce point qui se trouve sur la frontière du disque unité de convergence de la série de la fonction génératrice.

Ce résultat qui peut paraître à priori surprenant est en réalité la conséquence du Théorème de Pringsheim qui adresse la situation où les pôles de la fonction génératrice en question se trouvent localisés sur la frontière du disque de convergence de la série entière complexe.



Pour calculer  $E[Y_{2,T}]$ , il faut utiliser les  $\pi_i$  et donc déterminer la matrice de transition

On a  $\pi = (\pi_i)_{i \in E}$  sur l'espace d'états  $E$  tel que

$$\pi = \pi P$$

ou encore

$$\forall j \in E, \quad \pi_j = \sum_{i \in E} \pi_i p_{i,j} \tag{6.4}$$

$$\forall i \in E, \quad \pi_i \geq 0$$

$$\sum_{i \in E} \pi_i = 1$$

On calcule la matrice de transition

$$P = (p_{i,j})_{(i,j) \in E^2}$$

avec

$$p_{i,j} = P(Y_{2,n+1} = j \mid Y_{2,n} = i)$$

et

$$\forall i \in E, \quad \sum_{j \in E} p_{i,j} = 1$$

$$P = \begin{pmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & p_{0,2} & p_{0,3} & p_{0,4} & \cdots & p_{0,C_0} & \cdots & \cdots \\ p_{1,0} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdots \\ p_{2,0} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdots \\ p_{3,0} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdots \\ p_{4,0} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdots \\ p_{5,0} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdots \\ p_{C_0,0} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & p_{C_0,C_0} & \cdots & \cdots \\ \cdot & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdot & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{pmatrix}$$

On a :

$$Y_{2,n+1} = Y_{2,n} - D_{2,n} + A_{2,n} \tag{6.5}$$

$$Y_{2,n+1} = A_{2,n} + (Y_{2,n} - C_0) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_2 + C_0)} \tag{6.6}$$

$$\tag{6.7}$$

on pose :

$$Y_{2,n+1} = H(Y_{2,n}, A_{2,n})$$

## 6.2. CALCUL DE LA DISTRIBUTION DU NOMBRE DE CLIENTS DANS LE SYSTÈME EN RÉGIM

et

$$p_{i,j} = Q(\beta, \alpha)$$

Pour la matrice de transition :

$$\begin{aligned} Q(\beta, \alpha) &= P(Y_{2,n+1} = \alpha / Y_{2,n} = \beta) \\ &= P(H(Y_{2,n}, A_{2,n}) = \alpha / Y_{2,n} = \beta) \\ &= P(H(\beta, A_{2,n}) = \alpha) \\ &= \sum_z P(H(Y_{2,n}, A_{2,n}) = \alpha / A_{2,n} = z) U(z) \end{aligned}$$

or

$$U(z) = P(A_{2,n} = z)$$

(poissonnien) Donc

$$Q(\beta, \alpha) = \sum_{z; H(\beta, z) = \alpha} U(z)$$

Il reste à déterminer

$$z; H(\beta, z) = \alpha$$

$$\beta \Rightarrow Y_{2,n}$$

$$z \Rightarrow A_{2,n}$$

$$\alpha \Rightarrow Y_{2,n+1}$$

On a

$$Y_{2,n+1} = Y_{2,n} - D_{2,n} + A_{2,n} \quad (6.8)$$

$$Y_{2,n+1} = A_{2,n} + (Y_{2,n} - C_0) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} \quad (6.9)$$

Donc :

$$z + (\beta - C_0) \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} = \alpha$$

1<sup>re</sup> condition : si  $\beta \leq C_0$

Donc

$$z = \alpha \Rightarrow Q(\beta, \alpha) = U(\alpha) \Rightarrow Q(\beta, \alpha) = P(A_{2,n} = \alpha)$$

2<sup>me</sup> condition : si  $\beta > C_0$

On a :

$$z + \beta - C_0 = \alpha \Rightarrow z = \alpha - \beta + C_0 \Rightarrow Q(\beta, \alpha) = P(A_{2,n} = \alpha - \beta + C_0)$$

Revenons à l'équation 6.4 :

$$\begin{aligned} \pi_j &= \sum_{i \in E} \pi_i p_{i,j} \\ &= \sum_{i=0}^{C_0} \pi_i P\{A_{2,n} = j\} + \sum_{i=C_0+1}^{\infty} \pi_i P\{A_{2,n} = j - i + C_0\} \end{aligned}$$

Or,

$$P\{A_{2,n} = k'_2\} = \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{(\lambda_2 b_2 T)^{k'_2}}{k'_2!} e^{-\lambda_2 b_2 T} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2}$$

Donc,

$$\begin{aligned} \pi_j &= \sum_{i=0}^{C_0} \pi_i \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{(\lambda_2 b_2 T)^j}{j!} e^{-\lambda_2 b_2 T} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2} \\ &+ \sum_{i=C_0+1}^{\infty} \pi_i \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{(\lambda_2 b_2 T)^{j-i+C_0}}{j-i+C_0!} e^{-\lambda_2 b_2 T} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2} \end{aligned}$$

pour

$$j \geq 1$$

Or

$$j - i + C_0 \geq 0 \Rightarrow i \leq j + C_0$$

et

$$j \leq C_0$$

## 6.2. CALCUL DE LA DISTRIBUTION DU NOMBRE DE CLIENTS DANS LE SYSTÈME EN RÉGIM

(on ne pourra pas avoir une transition pour un état plus que l'état  $C_0$ )

Alors

$$\begin{aligned}
 \pi_j &= \sum_{i=0}^{C_0} \pi_i \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{(\lambda_2 b_2 T)^j}{j!} e^{-\lambda_2 b_2 T} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2} \\
 &+ \sum_{i=C_0+1}^{j+C_0} \pi_i \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{(\lambda_2 b_2 T)^{j-i+C_0}}{j-i+C_0!} e^{-\lambda_2 b_2 T} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2} \\
 &= \sum_{i=0}^{C_0} \pi_i \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{(\lambda_2 b_2 T)^j}{j!} e^{-\lambda_2 b_2 T} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2} \\
 &+ \sum_{i=1}^j \pi_{i+C_0} \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{(\lambda_2 b_2 T)^{j-i}}{(j-i)!} e^{-\lambda_2 b_2 T} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2}
 \end{aligned}$$

pour  $j \geq 1$

On pose

$$q_k = \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{(\lambda_2 b_2 T)^k}{k!} e^{-\lambda_2 b_2 T} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2}$$

Pour  $C_0 = 1$ , on a

$$\begin{aligned}
 \pi_0 &= \pi_0 q_0 + \pi_1 q_0 \\
 \pi_1 &= \pi_0 q_1 + \pi_1 q_1 + \pi_2 q_0 \\
 \pi_2 &= \pi_0 q_2 + \pi_1 q_2 + \pi_2 q_1 + \pi_3 q_0 \\
 &\vdots = \vdots + \vdots \\
 \pi_k &= \pi_0 q_k + \pi_1 q_k + \pi_2 q_{k-1} + \cdots + \pi_{k+1} q_0 \\
 &\vdots = \vdots \qquad \qquad \qquad + \vdots + \vdots \qquad \qquad \qquad + \vdots
 \end{aligned}$$

Pour  $C_0 = N$



## 6.2. CALCUL DE LA DISTRIBUTION DU NOMBRE DE CLIENTS DANS LE SYSTÈME EN RÉGIM

et dispensera de faire appel à des techniques plus sophistiquées d'analyse complexe pour résoudre le système linéaire dans les conditions les plus générales. Pour plus de détails sur ce sujet on peut consulter la section "Perspectives" de ce manuscrit. Dans le chapitre précédant nous nous sommes placés dans ce scénario ce qui nous a permis accessoirement de calibrer le paramétrage du contrôle d'admission.

Cette nouvelle formulation du problème conduit au système linéaire suivant :

$$\begin{array}{r}
 \pi_0 = q_0 B + \pi_N q_0 \\
 \pi_1 = q_1 B + \pi_N q_1 \\
 \vdots = \vdots + \vdots \\
 \pi_k = q_k B + \pi_N q_k \\
 \pi_N = q_N B + \pi_N q_N \\
 \pi_{N+1} \approx 0 \\
 \vdots \approx 0 \\
 \pi_{2N} \approx 0 \\
 \\
 \vdots = \vdots \qquad \qquad \qquad +\vdots + \vdots \qquad \qquad \qquad +\vdots
 \end{array}$$

Ce qui donne la relation suivante :

$$\pi_0 + \pi_1 + \dots + \pi_N = (B + \pi_N)(q_0 + q_1 + \dots + q_N)$$

Or  $B = \pi_0 + \dots + \pi_{N-1}$ . Ainsi :

$$q_0 + q_1 + \dots + q_N = 1$$

La relation précédente donne :

$$\begin{aligned}
 \pi_N &= q_N B + \pi_N q_N \\
 \pi_N &= \frac{q_N}{1 - q_N} B
 \end{aligned}$$

On obtient donc :

$$\pi_k = \frac{q_k B}{1 - q_N}$$

En fixant la valeur de B, nous pouvons déterminer les valeurs des  $\pi_k$ . A partir de ce résultat, on pourra par la suite calculer la distribution de probabilité du nombre de clients en slots dans le système. Ce calcul sera dans la section 6.4.1.

### 6.3 Analyse de la distribution du délai

Quand un client de la classe 2 quitte le système, ceux qui restent derrière lui sont ceux qui sont arrivés pendant son séjour dans le système.

$$Y = A_S$$

$Y$  : le nombre de clients qui sont laissés au instant de départ du client (variable aléatoire stationnaire du nombre de clients dans le système )

$A_S$  : nombre d'arrivées (Poisson composé) pendant le séjour  $S$  du client.

Ce qui va rester dans le système de la classe 2 après le départ du client = le nombre de clients dans le système qui arrivent pendant le séjour de ce client dans le système.

Le nombre de clients à l'instant de départ du client (ce qui est laissé dans le

système à l'instant de départ du client) = ceux qui sont arrivés pendant son séjour.

$$\begin{aligned}
P \{A_{2,t} = k\} &= \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{(\lambda_2 b_2 t)^k}{k!} e^{-\lambda_2 b_2 t} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2} \\
E [z^Y] &= E [z^{A_S}] \\
E [z^{A_S}] &= \sum_{k=0}^{\infty} z^k \mathbf{P} \{A_S = k\} \\
&= \sum_{k=0}^{\infty} z^k \int_0^{\infty} \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{(\lambda_2 b_2 t)^k}{k!} e^{-\lambda_2 b_2 t} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2} dS(t) \\
&= \sum_{b_2=1}^{m_2} \int_0^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k (\lambda_2 b_2 t)^k}{k!} e^{-\lambda_2 b_2 t} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2} dS(t) \\
&= \sum_{b_2=1}^{m_2} \int_0^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(z \lambda_2 b_2 t)^k}{k!} e^{-\lambda_2 b_2 t} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2} dS(t) \\
&= \sum_{b_2=1}^{m_2} \int_0^{\infty} e^{(z \lambda_2 b_2 t)} e^{-\lambda_2 b_2 t} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2} dS(t) \\
&= \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2} \int_0^{\infty} e^{(z \lambda_2 b_2 t)} e^{-\lambda_2 b_2 t} dS(t) \\
&= \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2} \int_0^{\infty} e^{-(1-z)\lambda_2 b_2 t} dS(t) \\
&= \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2} S^*((1 - z)\lambda_2 b_2) \\
&= \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2} S^*((1 - z)\lambda_2 b_2) = E [z^Y] \\
&= \sum_{b_2=1}^{m_2} U_{b_2} S^*((1 - z)\lambda_2 b_2) = E [z^Y]
\end{aligned}$$

Avec

$$U_{b_2} = \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2}$$

Or

$$E [z^Y] = \lim_{n \rightarrow \infty} E [z^{Y_{2,n+1}}] = E_A(z) \times \frac{1}{z^{C_0}} (Q(z) - \pi_0 - z\pi_1 - \dots - z^{C_0-1} \pi_{C_0-1})$$



Alors

$$\sum_{b_2=1}^{m_2} U_{b_2} S^*((1-z)\lambda_2 b_2) = E_A(z) \times \frac{1}{z^{C_0}} (Q(z) - \pi_0 - z\pi_1 - \dots - z^{C_0-1}\pi_{C_0-1})$$

Avec  $S^*(.)$  la transformée de Laplace de la variable aléatoire  $S(.)$  qui représente le temps de séjour d'un client dans la couche physique.

### Cas particulier : $m_2=1$

Ce cas particulier permet de réduire la taille du burst à un seul élément binaire. C'est le cas du processus de Poisson simple. On pourra dans ce cas extraire l'expression de  $S^*(.)$  et calculer par la suite la distribution du délai pour  $m_2=1$  comme suit :

$$S^*((1-z)\lambda_2) = E_A(z) \times \frac{1}{z^{C_0}} (Q(z) - \pi_0 - z\pi_1 - \dots - z^{C_0-1}\pi_{C_0-1})$$

on pose :

$$s = (1-z)\lambda_2$$

et

$$z = 1 - s/\lambda_2$$

$$S^*(s) = E_A(z) \times \frac{1}{(1-s/\lambda_2)^{C_0}} (Q(z) - \pi_0 - (1-s/\lambda_2)\pi_1 - \dots - (1-s/\lambda_2)^{C_0-1}\pi_{C_0-1})$$

Les équations précédentes relient la distribution du temps de transit d'un client (slot) à la distribution du nombre de slots dans le système. Or la taille d'une trame est aléatoire suivant la loi binomiale. Pour servir une trame MAC il faut servir tous les slots composant cette trame.

Soit  $X$  : temps de service d'une trame MAC au niveau de la couche physique. Le service d'une trame qui arrive au niveau de la couche MAC commence au plus tôt au niveau au début de la prochaine trame de la couche physique ;  $\Rightarrow$  du point de vue de la couche MAC le service de la couche physique est slotté.

$S$  : temps de transit d'un élément binaire (eb) de la trame MAC dans la couche physique

$S$  a été analysé et sa distribution de probabilité est supposée connue

Calculons la transformée de Laplace  $X^*(s)$  de la distribution de  $X$ .

Notons que :  $X$  est de la forme  $MS$  où  $M$  est la variable aléatoire qui représente la taille du burst en nombre d'éléments binaires (eb) et qui suit une distribution de probabilité binomiale de paramètres  $(m_2, p_2)$ . De plus cette variable  $M$  est indépendante de  $S$ . Donc pour un  $M$  fixé égal à  $m$ , la distribution de probabilité de  $MS$  est un produit de convolution d'ordre  $m$  de  $S$  ou encore en termes de transformée de Laplace le produit à la puissance  $m$  de la transformée de Laplace de  $S$ .

Le temps de transit des eb forme une suite de variable aléatoire iid

$$X^*(s) = E[e^{-sX}] = E[e^{-sMS}]$$

$$X^*(s) = \int_0^{\infty} E[e^{-sMS} | MS = t] dMS(t)$$

Or

$$P\{MS \leq t\} = \sum_m P\{MS \leq t | M = m\}P\{M = m\}$$

$$P\{MS \leq t\} = \sum_m P\{mS \leq t\} \frac{m_2!}{(m_2 - m)!m!} p_2^m (1 - p_2)^{m_2 - m}$$

Donc

$$X^*(s) = \int_0^{\infty} E[e^{-sMS} | MS = t] dMS(t)$$

$$X^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dMS(t)$$

$$X^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} \sum_{m=1}^{m_2} \frac{m_2!}{(m_2 - m)!m!} p_2^m (1 - p_2)^{m_2 - m} m dS(t)$$

$$X^*(s) = \sum_{m=1}^{m_2} \frac{m_2!}{(m_2 - m)!m!} p_2^m (1 - p_2)^{m_2 - m} m \int_0^{\infty} e^{-st} dS(t)$$

$$X^*(s) = \left( \sum_{m=1}^{m_2} \frac{m_2!}{(m_2 - m)!(m - 1)!} p_2^m (1 - p_2)^{m_2 - m} \right) S^*(s)$$

Or

$$\sum_{m=1}^{m_2} \frac{m_2!}{(m_2 - m)!(m - 1)!} p_2^m (1 - p_2)^{m_2 - m} = E[M] = m_2 * p_2$$

Donc

$$X^*(s) = E[M] * S^*(s)$$

$$X^*(s) = m_2 * p_2 * S^*(s)$$

La transformée de Laplace de la distribution de X est égale à la moyenne E[M] qui multiplie celle de S.

## 6.4 Calcul du délai moyen

Il est difficile de trouver la distribution du délai décrite dans la section précédente. Pour cela, nous allons procéder au calcul du délai moyen. Le délai moyen est calculé à partir du théorème de Little. Ce théorème relie le nombre moyen de clients dans le système  $E[Y_2]_s$  avec l'intensité du processus d'arrivée des clients et le séjour moyen des clients dans le système. On a par la suite

$$E[Y_2]_s = \lambda_2 E[S_2]$$

Alors le délai moyen  $E[S_2]$  est égal à :

$$E[S_2] = \frac{E[Y_2]_s}{\lambda_2}$$

Dans notre cas d'étude, on connaît le nombre moyen de clients dans la file d'attente qui correspond à  $E[Y_2]$ . on a :

$$E[Y_2] = \sum_{k=0}^{\infty} k \mathbf{P}\{Y_2 = k\}$$

et

$$\pi_k = \mathbf{P}\{Y_2 = k\}$$

A partir de l'hypothèse décrite dans la section 6.2, nous pouvons déterminer l'expression simplifiée de  $E[Y_2]$  ainsi que les valeurs des  $\pi_k$  en fixant la valeur de B comme suit :

$$E[Y_2] = \sum_{k=0}^{\infty} k \mathbf{P}\{Y_2 = k\} = \sum_{k=0}^{C_0-1} k \mathbf{P}\{Y_2 = k\}$$

et

$$\pi_k = \frac{q_k B}{1 - q_N}$$

Ayant la valeur de  $E[Y_2]$ , nous pouvons par le théorème de Little calculer le temps d'attente moyen dans la file  $E[W_2]$ . En effet, Le théorème de Little relie aussi le nombre moyen de clients dans la file  $E[Y_2]$  avec l'intensité du processus d'arrivée des clients et le séjour moyen des clients dans le système pour donner le temps d'attente moyen dans la file  $E[W_2]$ . On a par la suite

$$E[Y_2] = \lambda_2 E[W_2]$$

or

$$E[S_2] = E[X_2] + E[W_2]$$

avec  $E[X_2]$  est le temps de service moyen, correspondant à la durée d'une trame dans notre cas. Donc, connaissant  $E[W_2]$ , calculé à partir du théorème de Little, nous déterminerons par la suite  $E[S_2]$ .

## 6.5 Validation du modèle analytique de l'allocation de ressources radio V2X dans 5G par simulation

Afin de valider notre modèle analytique, nous allons évaluer la distribution du nombre de clients dans le système et le délai moyen de la classe 2 dans le système.

### 6.5.1 Distribution de probabilité du nombre du clients

Dans la section 6.2, nous avons obtenu la méthode analytique pour calculer la distribution de probabilité du nombre du clients de la classe 2. Nous avons trouvé la relation suivante :

$$\pi_k = \frac{q_k B}{1 - q_N}$$

Avec

$$B = \pi_0 + \dots + \pi_{N-1}.$$

En fixant la valeur du paramètre B, on pourra calculer les valeurs analytiques de la distribution de probabilité du nombre du clients de la classe 2 (Figure 6.1).

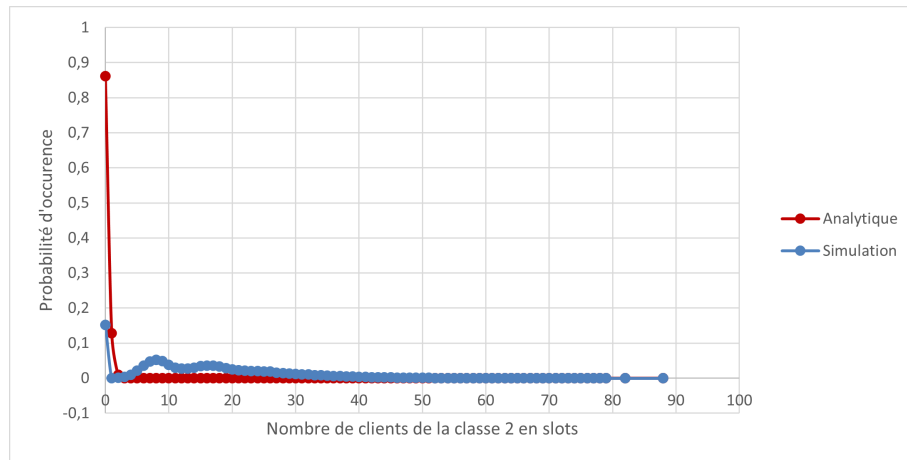


FIGURE 6.1 – Distribution de probabilité du nombre du clients de la classe 2  $\rho_2=0.06\rho$

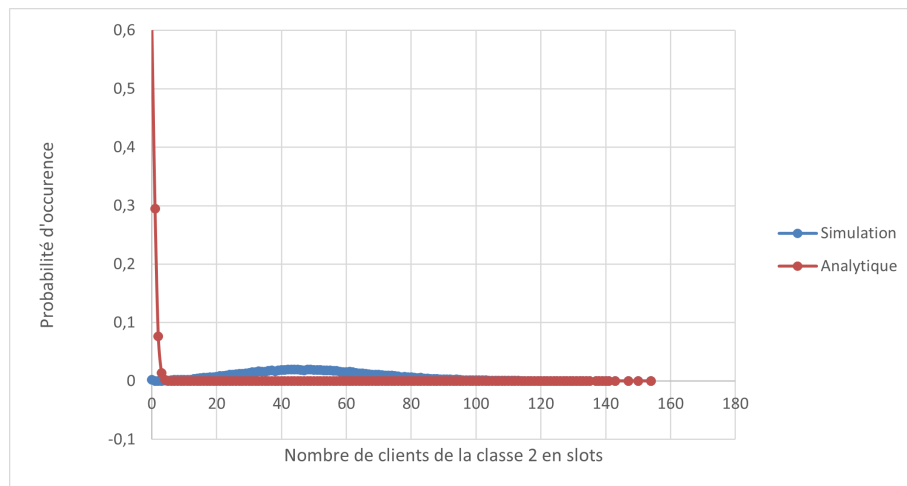


FIGURE 6.2 – Distribution de probabilité du nombre du clients de la classe 2  $\rho_2=0.2\rho$

## 6.5. VALIDATION DU MODÈLE ANALYTIQUE DE L'ALLOCATION DE RESSOURCES RADIO VS

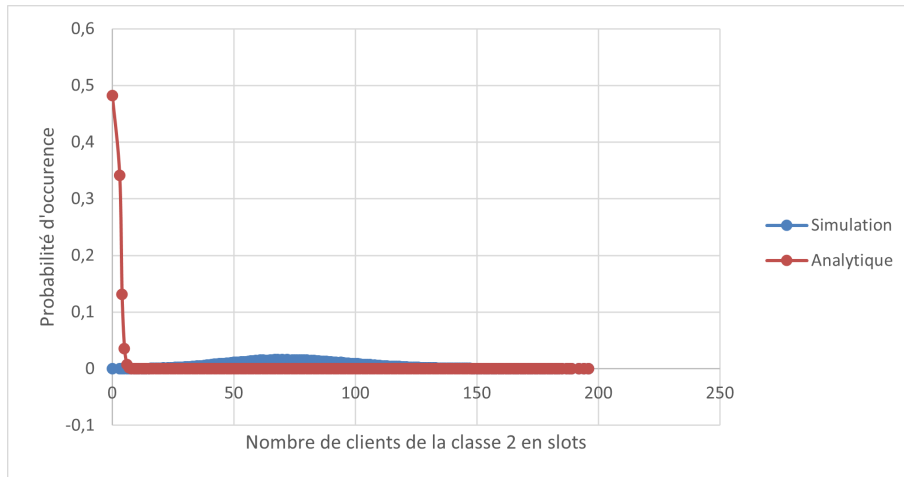


FIGURE 6.3 – Distribution de probabilité du nombre du clients de la classe 2  $\rho_2=0.3\rho$

Nous fixons la valeur de B très proche de 1 :  $B=0.99999$  et on suppose par la suite qu'il n'y a presque pas d'attente.

Nous avons calculé les  $\pi_i$  numériquement et nous avons simulé notre système avec le processus Poisson composé. Nous avons varié les valeurs de  $\rho_2$  ( $\rho_2=0.06\rho$ ,  $\rho_2=0.2\rho$ ,  $\rho_2=0.3\rho$ ) pour un facteur de charge  $\rho = 50\%$  comme décrit dans le tableau 5.3 dans le chapitre précédent. Nous étudions la validation de notre modèle pour ces 3 scénarios.

Pour le scénario 1 (Figure 6.1) : pour une charge faible de ( $\rho_2=0.06\rho$ ), nous avons numériquement des valeurs de probabilités de nombre de clients de la classe 2 qui se focalisent principalement sur les petites valeurs de nombre de clients (entre 0 et 10). On trouve la même constatation pour la simulation avec une distribution de probabilité concentrée les petites valeurs de nombre de clients (entre 0 et 40) et la distribution s'étale de 41 jusqu'au 89 clients avec de très faibles valeurs de probabilités. La figure 6.1 montre que la distribution de probabilité du nombre de clients numériquement est cohérente par rapport à la simulation. En effet, la distribution du nombre de clients se rapprochent pour les petites et les grandes valeurs de nombre de clients analytiquement et par simulation.

Pour le scénario 2 (Figure 6.2) : pour une charge faible de ( $\rho_2=0.2\rho$ ), nous avons numériquement des valeurs de probabilités de nombre de clients de la classe 2 qui se focalisent principalement sur les petites valeurs de nombre de clients (entre 0 et 15). On trouve la même constatation pour la simulation avec une distribution de probabilité concentrée les petites valeurs de nombre de clients (entre 0 et 80) et la distribution s'étale de 81 jusqu'au 155 clients avec de très faibles valeurs de probabilités. La figure 6.1 montre que la distribution de probabilité du nombre

de clients numériquement est cohérente par rapport à la simulation. En effet, la distribution du nombre de clients se rapprochent pour les petites et les grandes valeurs de nombre de clients analytiquement et par simulation. L'étalement de la distribution de probabilité du nombre de clients (analytique et simulation) se fait d'une manière cohérente.

Pour le scénario 3 (Figure 6.3) : pour une charge faible de ( $\rho_2=0.3\rho$ ), nous avons numériquement des valeurs de probabilités de nombre de clients de la classe 2 qui se focalisent principalement sur les petites valeurs de nombre de clients (entre 0 et 40). On trouve la même constatation pour la simulation avec une distribution de probabilité concentrée les petites valeurs de nombre de clients (entre 0 et 120) et la distribution s'étale de 121 jusqu'au 195 clients avec de très faibles valeurs de probabilités. La figure 6.1 montre que la distribution de probabilité du nombre de clients numériquement est cohérente par rapport à la simulation. En effet, la distribution du nombre de clients se rapprochent pour les petites et les grandes valeurs de nombre de clients analytiquement et par simulation. L'étalement de la distribution de probabilité analytique est cohérent avec suit ce de la lui simulation.

A partir de ces 3 scénarios, la simulation valide le modèle analytique et celui ci valide la simulation vu le comportement cohérent de la distribution du nombre de clients pour la classe 2 dans les deux cas (simulation et modèle analytique).

### 6.5.2 Délai moyen (temps de séjour moyen)

Dans la section 6.4, nous avons obtenu le calcul analytique du délai moyen (temps de séjour moyen). Nous avons les mêmes scénarios décrits dans la section précédente. La valeur de B est fixée à 0.99999. La figure 6.4 montre la variation du temps de séjour moyen de la classe 2 en fonction des arrivées par simulation et par calcul analytique pour les différents scénarios. Le temps de séjour est la somme du temps de service d'un slot dans le système (durée d'une trame=10ms) et le temps d'attente d'un slot. Nous constatons que nous avons les délais moyens analytiquement ont la valeurs de 10.7 ms pour les différents scénarios. Concernant la simulation, on trouve une valeur au tour de 15 ms pour les différents scénarios. La simulation montre un délai d'attente au tour d'une demi trame en moyenne ne dépassant pas une demi trame de 5ms (pas d'attente plus que l'attente moyenne résiduelle). Le modèle analytique montre un temps d'attente moyen au tour de 0.7ms. Ce résultat confirme que le modèle analytique utilisant la méthode de troncature montre un délais d'attente moyen ne dépassant pas une demi trame, c'est à dire on aura pas d'attente plus que l'attente moyenne résiduelle. On constate par la suite que le modèle analytique par troncature ne dégradent pas les performances en termes de distribution de nombre de clients dans le système et la distribution du délai. On peut dans ce cas pouvoir dimensionner notre système par le modèle analytique qui sera une solution moins coûteuse par rapport à la simulation.

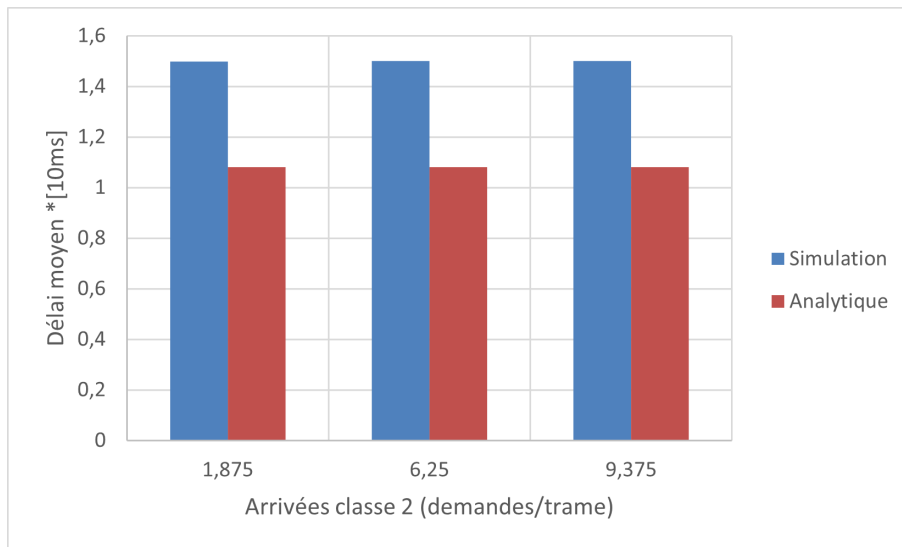


FIGURE 6.4 – Temps de séjour moyen de la classe 2 (délai moyen)

## 6.6 Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre les performances de la classe critique à partir de la chaîne Markov trace. Nous avons établi dans ce chapitre le calcul de la distribution du nombre de clients dans le système en régime stationnaire aux instants de départ, l'analyse de la distribution du délai, le calcul du délai moyen, les caractéristiques du trafic des deux classes. Nous avons montré la validation du modèle analytique de l'allocation de ressources radio V2X dans 5G par simulation (distribution de probabilité du nombre du clients et délai moyen) pour 3 scénario différents.





# Chapitre 7

## Conclusion

### 7.1 Bilan des travaux

La communication entre véhicules présente une grande importance puisqu'elle permet de réduire considérablement le nombre de décès sur les routes, d'améliorer la mobilité et de permettre un haut niveau d'automatisation des véhicules. Il existe différentes technologies qui assurent la communication entre les différentes entités des réseaux véhiculaires (véhicule, infrastructure, piéton et réseau). Parmi ces technologies, la technologie LTE qui est connue pour les réseaux cellulaires. Cette technologie, proposée par la 3GPP release 14, a été candidate pour garantir la communication dans le monde véhiculaire et fait référence à LTE-V2X ou cellular V2X ou encore LTE-V. Nous nous sommes intéressés dans la première partie de cette thèse sur la technologie LTE-V et plus particulièrement sur la gestion de l'allocation des ressources radios pour la communication directe (véhicule à véhicule). Ce mode de communication directe est basé sur les communications D2D définies dans le cadre des services basés sur la proximité (ProSe) dans les versions 12 et 13 de LTE. Une nouvelle interface D2D (appelée PC5, également appelée « sidelink ») a été introduite et a été améliorée pour les communications V2X pour prendre en charge les cas d'utilisation des véhicules à haute vitesse (250 km / h) et haute densité (milliers de nœuds). LTE sidelink (ou D2D) comprend deux modes de fonctionnement pour la gestion des ressources radios : mode 1 et mode 2. Les véhicules connectés nécessitent des communications V2X hautement fiables et à faible latence, pour cette raison, 3GPP Release 14 introduit deux nouveaux modes de communication (modes 3 et 4) spécialement conçus pour les communications V2V. En mode 3, la sélection des sous-canaux est gérée par la station de base ou eNodeB, cependant en mode 4, les véhicules sélectionnent leurs ressources radio d'une manière autonome indépendamment s'ils sont sous couverture du réseau cellulaire ou pas. Dans la littérature, différentes propositions d'algorithmes

d'allocation de ressources pour les différents mode 3 et mode 4. Dans la première partie de la thèse, on s'intéresse par le mode 3. Selon une étude détaillée des propositions existantes de la littérature, la majorité d'eux ne traitent que les messages périodiques CAM assurant un minimum de sécurité. Pour notre contribution, nous allons considérer l'existence des messages DENM pour les types d'applications critiques (accident, bouchon,) dans LTE-V tout en garantissant une forte fiabilité et une faible latence. Dans ce contexte, nous avons proposé une approche d'allocation des ressources basée sur la priorité et la garantie, qui réserve d'abord une capacité garantie pour les applications critiques et partage la capacité restante avec d'autres types de trafic moins critiques. Cette approche permet de protéger le trafic prioritaire surtout dans les réseaux avec forte densité routière. Dans un deuxième lieu, nous avons proposé une autre approche. Cette nouvelle approche introduit le mécanisme de garantie ainsi que celui de la priorité comme l'approche décrite ci-dessus. Elle introduit aussi la technique de réutilisation des ressources pour les deux types de messages (critiques et moins critiques) afin d'utiliser efficacement la capacité du réseau. Cette approche permet en effet de satisfaire les exigences des applications les plus critiques sans pénaliser celles les moins.

La technologie LTE-V présente une étape importante vers la nouvelle génération 5G. C'est le sujet de la deuxième partie de cette thèse. Parmi les objectifs de la 5G est de garantir la très haute fiabilité et la faible latence pour les applications temps réel critiques à travers les communications URLLC. Dans cette partie de la thèse, on va s'intéresser à la couche MAC qui sera portée par la nouvelle couche physique 5G. L'URLLC a été spécifié pour offrir aux flux applicatifs une faible latence et une haute intégrité. Il semble tout à fait attractif pour être utilisé dans le contexte du V2X/5G. De plus, avec le concept du « Network Slicing », l'architecture fonctionnelle du réseau 5G offre la portabilité du réseau véhiculaire avec ses services à côté d'autres réseaux de services au sein du réseau mobile 5G. Nous avons choisi d'intégrer l'architecture du réseau véhiculaire 5G dans un même slice au niveau du réseau d'accès ce qui permet de bénéficier du gain statistique en termes de l'utilisation des ressources radios. On s'est intéressé aux couches MAC et physique NR. Nous avons étudié l'allocation dynamique des ressources radios entre les communications URLLC critiques et les communications de streaming portées dans un même Slice. L'ordonnanceur utilisé permet en premier lieu de réserver une partie minimale de la capacité spectrale pour les flux de streaming. En deuxième lieu, il assure la gestion dynamique des ressources spectrales restantes entre les flux URLLC critiques et les flux de streaming échangés entre véhicules et les serveurs d'applications. Nous avons proposé plusieurs modèles statistiques de flux échangés et analysé par simulation la QoS offerte dans le réseau d'accès aux flux critiques/streaming. Nous avons également proposé un modèle analytique markovien quasi-exact de la traversée des couches MAC/Physique du flux URLLC avec

comme objectif de dimensionner un mécanisme de contrôle d'admission (CAC) des flux critiques dans le slice et de garantir la QoS requise par ces flux.

## 7.2 Perspectives

### 7.2.1 Pourcentage des ressources radios garanties

Nous avons utilisé dans nos approches d'allocation de ressources radios la réservation des ressources pour les deux parties de la thèse.

Dans la partie LTE-V, nous avons implémenté dans nos approches PEARL et PEARL-RM des ressources garanties pour la classe la plus critique (safety). Nous avons proposé 10% des ressources comme étant les ressources réservées. Nous avons également dans la partie 5G-URLLC, considéré dans notre algorithme la réservation des ressources. Cette dernière permet de dédier 10% des ressources totales à la classe la moins critique.

Les recherches futures devraient se concentrer sur la détermination de la valeur appropriée de la pourcentage des ressources garanties dans les deux parties de la thèse pour atteindre la performance optimale du système. Cette étude sera basée sur une approche d'apprentissage afin de laisser l'infrastructure du réseau choisir la valeur la plus appropriée des ressources réservées en fonction des conditions du réseau et de la bande passante du réseau.

### 7.2.2 Hypothèse de troncature de la distribution de probabilité pour la classe 2

Comme présentée dans le chapitre 6, le fait d'étaler la distribution de probabilité du nombre de clients dans le système de 0 à  $N$  :  $\pi_j; j = 0, \dots, N$  en négligeant les  $\pi_j; j \geq N + 1$  se justifie dans la perspective d'un dimensionnement du système qui limite au maximum l'attente qui précède l'émission du client. La simulation numérique avec un bon paramétrage de la charge du système a montré la pertinence de cette approche et cela a permis de faciliter la résolution algébrique du système linéaire.

Dans ce paragraphe nous allons discuter des solutions possibles pour résoudre le système linéaire sans approximation qui tronque la distribution de probabilité. Deux pistes de solution apparaissent possibles qui utilisent le riche arsenal de l'analyse complexe. La première est basée sur une approche analytique, la seconde est basée sur une approche géométrique. Les deux approches exploitent l'analyticité de la fonction génératrice dans le disque unité du plan complexe  $z < 1$ .

Rappelons la notation utilisée dans ce manuscrit :

$$Q(z) = \sum_{j=0}^{\infty} \pi_j z^j$$

avec  $\pi_j = P\{Y = j\}$  et que la forme explicite de  $Q(z)$  est donnée par :

$$Q(z) = \frac{E_A(z)}{E_A(z) - z^{C_0}} \sum_{j=0}^{C_0-1} z^j \pi_j$$

### Approche Analytique

Rappelons que la fonction génératrice est absolument convergente dans le disque unité car elle est majorée en module (pour  $z = 1$ ) par la  $\sum_{j=0}^{\infty} \pi_j$  qui est égale à 1 dans un système stable ayant une distribution de probabilité stationnaire non dégénérée et unique à une constante multiplicative près. Le disque unité est le disque de convergence de cette fonction génératrice regardée comme une série entière de Taylor.

Cette approche utilise les formules de Cauchy et la forme explicite de la fonction génératrice pour calculer le nième coefficient de la série

$$\pi_j = \frac{1}{2i\pi} \int_{\gamma} \frac{Q(z)}{z^j} dz$$

$\gamma$  étant une courbe fermée incluse dans le disque unité sur laquelle  $Q(z)$  est analytique et qui entoure l'origine.

Cette méthode peut s'avérer difficile quand la forme explicite de  $Q(z)$  est compliquée qui rend l'intégration plus ou moins problématique. Cette méthode peut faire appel au théorème des résidues en présence de singularité dans le domaine d'intégration. En plus comme dans notre cas  $N=450$  il y aura beaucoup de calcul intégral à faire pour obtenir tous les  $\pi_j$  jusqu'à  $\pi_N$ .

### Approche géométrique

Compte tenu que la forme explicite de la fonction génératrice était :

$$Q(z) = \frac{E_A(z)}{E_A(z) - z^{C_0}} \sum_{j=0}^{C_0-1} z^j \pi_j$$

Rappelons que :

$$E_A(z) = e^{\lambda T((zp+(1-p))^m - 1)} \quad (7.1)$$

Nous avons vu que  $z = 1$  est un pôle de  $Q(z)$  situé sur la frontière du disque unité. Le fait que la fonction génératrice soit analytique donc sans pôle dans disque unité requiert que ces pôles qui tombent à l'intérieur du disque unité et qui sont solution de l'équation

$$E_A(z) - z^{C_0} = 0$$

sont "éliminables" avec les zéros du numérateur qui sont les solutions de l'équation

$$\sum_{j=0}^{C_0-1} z^j \pi_j = 0$$

car  $E_A(z)$  la fonction génératrice du Poisson composé est une quantité positive non nulle dans le disque unité. Comme on connaît la forme explicite du dénominateur on peut chercher explicitement ces racines à l'intersection des deux surfaces complexes  $E_A(z)$  et  $z^{C_0}$  pour les  $z$  dans le disque unité. On peut géométriquement calculer les points de chaque surface pour les différentes valeurs de  $z$ , localiser géométriquement les points d'intersection et projeter ces points d'intersection sur le disque unité du plan complexe. Ces points géométriquement identifiés doivent être solutions de l'équation en  $z$

$$\sum_{j=0}^{C_0-1} z^j \pi_j = 0$$

C'est un système linéaire (de relative grande dimension) à résoudre. La méthode proposée est basée sur les relations de Viète [86]. Ce sont les relations entre les racines et les coefficients d'un polynôme. En effet, à partir des racines, on pourra déterminer les coefficients du polynôme. Dans notre cas, on cherche les coefficients, c'est à dire les  $\pi_i$ , donc connaissant les racines  $Z_i$  de notre polynôme, on pourra calculer les coefficients  $\pi_i$  selon le théorème de Viète ci-dessous :

$$(-1)^k \frac{\pi_{n-k}}{\pi_n} = \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} Z_{i_1} Z_{i_2} \dots Z_{i_k} \quad (7.2)$$

### 7.2.3 Variation du facteur de charge du système $\rho$

Il est aussi pertinent d'évaluer le système avec des facteurs de charge plus grande que 0.5. Et évaluer par la suite les performances du système.

### 7.2.4 Network Slicing

Dans le cadre des travaux menés sur l'URLLC dans le contexte véhiculaire, nous avons considéré une architecture de réseau véhiculaire 5G qui repose sur un seul slice où nous avons intégré une classe de service de type temps réel critique pour le transport des messages de l'URLLC avec une classe de service de type streaming qui est traditionnellement de type temps réel moins critique. L'intégration de ces deux services transportés sur un même slice qui est doté d'un ordonnanceur approprié permet à la classe non critique de bénéficier du gain statistique résultant de l'inactivité de la classe critique. Cette situation paraît appropriée dans le contexte applicatif du contrôle en temps réel et à distance des véhicules de type navette autonome supervisée par le cloud sur un réseau mobile 5G. Bien entendu, les véhicules autonomes peuvent échanger d'autre type d'information associée d'autres grandes classes d'applications ITS (comme la sécurité routière ou la gestion du trafic routier). Dans ce cas le réseau véhiculaire peut utiliser d'autre types de réseau de transport de l'information comme le réseau ITS/G5 basée la technologie 802.11p. On peut envisager de faire cohabiter des architectures de réseaux hétérogènes sur les différents véhicules connectés en réseau. Avec le concept de slicing offert par l'architecture 5G, on peut déployer à côté d'un slice qui porte les applications temps réel critique un second slice pour le transport des applications qui auraient été portées par l'architecture ITS/G5 (comme la gestion du trafic routier par exemple). Une telle solution qui repose entièrement sur la 5G sera probablement plus économique et moins complexe à gérer qu'une solution qui repose sur des technologies radios et réseaux hétérogènes.

# Annexe A

## Calcul des Arrivées

On a :

$$K' = A_{1,T} + A_{2,T}$$

Par définition, le Poisson composé  $Z$  s'écrit sous la forme suivante :

$$Z = \sum_{n=0}^N Y_n$$

, où  $N$  est un processus de Poisson et  $Y_n$ , pour tout  $n$ , est une suite de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées et indépendantes de  $N$ . Donc

$$K' = A_{1,T} + A_{2,T}$$
$$K' = \sum_{n=0}^{K_1} B_{1,n} + \sum_{n=0}^{K_2} B_{2,n}$$

tel que  $K_1$  suit la loi Poisson( $\lambda_1$ ),  $K_2$  suit la loi Poisson d'intensité ( $\lambda_2$ ) et pour tout  $n$ ,  $B_{1,n}$  suit la loi binomiale  $B_1$  de paramètres ( $m_1, p_1$ ) et pour tout  $n$ ,  $B_{2,n}$  suit la loi binomiale  $B_2$  de paramètres ( $m_2, p_2$ )

On a donc :

$$K' = \sum_{n=0}^{K_1} B_{1,n} + \sum_{n=0}^{K_2} B_{2,n}$$

$$K' = B_{1,1} + B_{1,2} + B_{1,3} + \dots + B_{1,K_1} + B_{2,1} + B_{2,2} + B_{2,3} + \dots + B_{2,K_2}$$

$$K' = K_1 B_1 + K_2 B_2$$



arrivées venant chacune des classes. Notons que  $E[K'] < C$ .

Calculons  $P\{K' = k'\}$

$$P\{K' = k'\} = \sum_{k'_1, k'_2} P\{K_1 B_1 = k'_1, K_2 B_2 = k'_2; k'_1 + k'_2 = k'\}$$

$$P\{K' = k'\} = \sum_{k'_1=0}^{k'} P\{K_1 B_1 = k'_1\} P\{K_2 B_2 = k' - k'_1\}$$

(indep des deux classes) Calculons  $P\{K_1 B_1 = k'_1\}$  pour la classe 1

$$P\{K_1 B_1 = k'_1\} = \sum_{b_1=1}^{m_1} P\{K_1 B_1 = k'_1, B_1 = b_1\}$$

Formule de Bayes

$$P\{K_1 B_1 = k'_1\} = \sum_{b_1=1}^{m_1} P\{K_1 B_1 = k'_1 / B_1 = b_1\} P\{B_1 = b_1\}$$

$$P\{K_1 B_1 = k'_1\} = \sum_{b_1=1}^{m_1} P\{K_1 b_1 = k'_1\} P\{B_1 = b_1\}$$

Calculons

$$P\{K_1 b_1 = k'_1\}$$

$b_1 K_1$  est la somme de  $b_1 * Poisson(\lambda_1, T)$  indep donc c'est  $Poisson(\lambda_1 b_1, T)$  d'où :

$$P\{K_1 b_1 = k'_1\} = \frac{(\lambda_1 b_1 T)^{k'_1}}{k'_1!} e^{-\lambda_1 b_1 T}$$

Calculons  $P\{B_1 = b_1\}$

$$P\{B_1 = b_1\} = \frac{m_1!}{b_1!(m_1 - b_1)!} p_1^{b_1} (1 - p_1)^{m_1 - b_1}$$

Alors

$$P\{K_1 B_1 = k'_1\} = \sum_{b_1=1}^{m_1} \frac{(\lambda_1 b_1 T)^{k'_1}}{k'_1!} e^{-\lambda_1 b_1 T} \frac{m_1!}{b_1!(m_1 - b_1)!} p_1^{b_1} (1 - p_1)^{m_1 - b_1}$$

Et pour la classe 2

$$P \{K_2 B_2 = k'_2\} = \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{(\lambda_2 b_2 T)^{k'_2}}{k'_2!} e^{-\lambda_2 b_2 T} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2}$$

Rappelons que  $E[K'] < C$ .

Donc, on définit  $A_{1,n}$  comme étant la probabilité d'avoir  $k'_1$  clients pendant la durée de la trame PHY  $n$  (durée  $T$ ) :

$$P \{A_{1,n} = k'_1\} = P \{K_1 B_1 = k'_1\} = \sum_{b_1=1}^{m_1} \frac{(\lambda_1 b_1 T)^{k'_1}}{k'_1!} e^{-\lambda_1 b_1 T} \frac{m_1!}{b_1!(m_1 - b_1)!} p_1^{b_1} (1 - p_1)^{m_1 - b_1}$$

Et  $A_{2,n}$  comme étant la probabilité d'avoir  $k'_2$  clients arrivant pendant la durée de la trame PHY  $n$  (durée  $T$ ) :

$$P \{A_{2,n} = k'_2\} = P \{K_2 B_2 = k'_2\} = \sum_{b_2=1}^{m_2} \frac{(\lambda_2 b_2 T)^{k'_2}}{k'_2!} e^{-\lambda_2 b_2 T} \frac{m_2!}{b_2!(m_2 - b_2)!} p_2^{b_2} (1 - p_2)^{m_2 - b_2}$$

$$P \{A_{1,n} + A_{2,n} = k'\} = \sum_{k'_1=0}^{k'} P \{A_{1,n} = k'_1\} P \{A_{2,n} = k' - k'_1\}$$

C'est une convolution discrète entre  $A_{1,n}$  et  $A_{2,n}$



# Annexe B

## Calcul des départs

On commence par le calcul de  $D_{2,n}$ . On calcule  $D_{2,n}$  pour 3 différentes conditions comme le montre le tableau B.1 en variant  $Y_{2,n}$  qui est le nombre de clients de la classe 2 juste après le départ de la trame  $n - 1$  :

- Si  $Y_{2,n} = 0$ , on n'aura pas de départs de la classe 2 donc  $D_{2,n} = 0$
- Si  $Y_{2,n} \leq C_0$ , dans ce cas les départs de la file de la classe 2 pourront tous partir et donc  $D_{2,n} = Y_{2,n}$
- Si  $Y_{2,n} > C_0$ , dans ce cas les départs de la file dépassent les slots autorisés à la classe 2, donc une partie des départs  $Y_{2,n}$  pourra partir et cette partie est égale exactement à  $C_0$ , donc  $D_{2,n} = C_0$

Condition	$Y_{2,n} = 0$	$Y_{2,n} \leq C_0$	$Y_{2,n} > C_0$
$D_{2,n}$	0	$Y_{2,n}$	$C_0$

TABLE B.1 – Les départs  $D_{2,n}$ .

Alors :  $D_{2,n} = Y_{2,n} \times (1 - \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)}) + C_0 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)}$

Avec  $\mathbf{1}(a < X < b)$  est une fonction indicatrice définie par :

$$\mathbf{1}(a < X < b) = \begin{cases} 1 & \text{si } a < X < b \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

On calcule maintenant les Départs pendant la trame  $n$  de la classe 1 :  $D_{1,n}$  pour 7 différentes conditions en variant  $Y_{1,n}$  qui est le nombre de clients de la classe 1 juste après le départ de la trame  $n - 1$  :

- Si  $Y_{1,n} = 0$ , on n'aura pas de départs de la classe 1 donc  $D_{1,n} = 0$
- Si  $0 < Y_{1,n} \leq C_1$ , dans ce cas les départs de la file ne dépassent pas les slots garantis de la classe 1, donc  $D_{1,n} = Y_{1,n}$

- Si  $C_1 < Y_{1,n} \leq C_1 + C_0$  et  $Y_{2,n} = 0$ , dans ce cas les départs de la file de la classe 1 dépassent les slots garantis de la classe 1 et ne dépassent pas  $C_1 + C_0$ . on doit vérifier dans ce cas les départs de la classe 2, si comme dans ce cas où ils n'y a pas de départs classe 2, les départs de la classe 1 pourra utiliser les slots restants, c'est à dire l'ensemble  $C_1 + C_0$ , donc  $D_{1,n} = Y_{1,n}$
- Si  $Y_{1,n} > C_1 + C_0$  et  $Y_{2,n} = 0$ , dans ce cas les départs de la file de la classe 1 dépassent les slots garantis de la classe 1 et dépassent  $C_1 + C_0$ . on doit vérifier dans ce cas les départs de la classe 2, si comme dans ce cas où ils n'y a pas de départs de la classe 2, les départs de la classe 1 pourra utiliser que les slots restants, c'est à dire l'ensemble  $C_1 + C_0$ , donc  $D_{1,n} = C_1 + C_0$
- Si  $C_1 < Y_{1,n} \leq C - Y_{2,n}$  et  $Y_{2,n} \leq C_0$ , dans ce cas les départs de la file de la classe 1 dépassent les slots garantis de la classe 1 et ne dépassent pas  $C - Y_{2,n}$ . on doit vérifier dans ce cas les départs de la classe 2, si comme dans ce cas où ils ne dépassent pas  $C_0$ , les départs de la classe 1 pourra utiliser à partir des slots restants après les départs de la classe 2, selon  $Y_{2,n}$ , donc  $D_{1,n} = Y_{1,n}$
- Si  $Y_{1,n} > C - Y_{2,n}$  et  $Y_{2,n} \leq C_0$ , dans ce cas les départs de la file de la classe 1 dépassent les slots garantis de la classe 1, on doit vérifier dans ce cas les départs de la classe 2, si comme dans ce cas où ils ne dépassent pas  $C_0$ , les départs de la classe 1 pourra utiliser les slots restants après les départs de la classe 2, donc  $D_{1,n} = C - Y_{2,n}$
- Si  $Y_{1,n} > C_1$  et  $Y_{2,n} > C_0$ , dans ce cas les départs de la file de la classe 1 dépassent les slots garantis de la classe 1, on doit vérifier dans ce cas les départs de la classe 2, si comme dans ce cas où ils dépassent  $C_0$ , les départs de la classe 2 vont tous partir et par la suite il ne reste que les slots garantis de la classe 1 pour les départs de la classe 1, donc  $D_{1,n} = C_1$

Alors :

Condition	$Y_{1,n} = 0$	$0 < Y_{1,n} \leq C_1$	$C_1 < Y_{1,n} \leq C_1 + C_0$ et $Y_{2,n} = 0$	$Y_{1,n} > C_1 + C_0$ et $Y_{2,n} = 0$	$C_1 < Y_{1,n} \leq C - Y_{2,n}$ et $Y_{2,n} \leq C_0$	$Y_{1,n} > C - Y_{2,n}$ et $Y_{2,n} \leq C_0$	$Y_{1,n} > C_1$ et $Y_{2,n} > C_0$
$D_{1,n}$	0	$Y_{1,n}$	$Y_{1,n}$	$C_1 + C_0$	$Y_{1,n}$	$C - Y_{2,n}$	$C_1$

TABLE B.2 – Les départs  $D_{1,n}$ .

$$\begin{aligned}
 D_{1,n} = & Y_{1,n} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} \leq C_1)} + Y_{1,n} \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n}=0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,n} \leq C_1 + C_0)} \\
 & + (C_0 + C_1) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n}=0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} > C_1 + C_0)} + Y_{1,n} \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,n} \leq C - Y_{2,n})}
 \end{aligned}$$

+

$$(C - Y_{2,n}) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} > C - Y_{2,n})} + C_1 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} > C_1)}$$

La distribution de probabilité du nombre de slots de la classe 2 juste après le départ d'une trame générique  $n$  est insensible à la présence de la classe 1 dans le système (la distribution de probabilité de la classe 2 ne dépend pas de celle la classe 1).



## Annexe C

# Calcul du nombre moyen des clients dans le système

Nous allons détailler le calcul des termes de l'expression du calcul du nombre moyen des clients dans le système. Le processus d'arrivée étant indépendant de l'état du système  $A_{n,T} \perp Y_n$  alors :

$$E[A_{n,T}Y_n] = E[A_{n,T}] E[Y_n]$$

$A_{n,T} \perp D_n$  (puisque  $D_n$  dépend que de  $Y_n$  et  $Y_n \perp A_{n,T}$ )

Quand  $n \rightarrow \infty : Y_{n+1}, Y_n \rightarrow Y_\infty$

$E[Y_{n+1}^2]$  et  $E[Y_n^2] \rightarrow E[Y_\infty^2]$

La convergence de  $E[A_{i,n}^2]_{i \in \{1,2\}}$  est identique à la convergence du cours 69.

$E[A_{i,n}^2] \rightarrow E[A_i^2]_{i \in \{1,2\}}$  quand  $n \rightarrow \infty$

$E[A_i^2] = VAR_i + E[A_i]^2$

$$E[Y_{n+1}^T Y_{n+1}] = E[Y_{1,n+1}^2] + E[Y_{2,n+1}^2]$$

Quand  $n \rightarrow \infty$

$$E[Y_{n+1}^T Y_{n+1}] = E[Y_{1,\infty}^2] + E[Y_{2,\infty}^2]$$

$$E[Y_{n+1}^T Y_{n+1}] = E[Y_{1,T}^2] + E[Y_{2,T}^2]$$

Par simplification [83]



$$\begin{aligned}
 E[Y_{1,T}^2] + E[Y_{2,T}^2] &= \lim_{n \rightarrow \infty} E[A_{1,n}^2] + \lim_{n \rightarrow \infty} E[D_{1,n}^2] + \lim_{n \rightarrow \infty} E[Y_{1,n}^2] - 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E[D_{1,n}Y_{1,n}] \\
 &\quad - 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E[D_{1,n}] \lim_{n \rightarrow \infty} E[A_{1,n}] + 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E[A_{1,n}] \lim_{n \rightarrow \infty} E[Y_{1,n}] + \lim_{n \rightarrow \infty} E[A_{2,n}^2] \\
 &+ \lim_{n \rightarrow \infty} E[D_{2,n}^2] + \lim_{n \rightarrow \infty} E[Y_{2,n}^2] + 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E[A_{2,n}] \lim_{n \rightarrow \infty} E[Y_{2,n}] - 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E[D_{2,n}Y_{2,n}] - 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E[D_{2,n}]
 \end{aligned}$$

On commence terme par terme :

1/ On calcule  $\lim_{n \rightarrow \infty} E[A_{1,n}^2]$  et  $\lim_{n \rightarrow \infty} E[A_{2,n}^2]$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E[A_{i,n}^2] = E[A_{i,T}^2] = \sigma_{A_{i,n}}^2 + E[A_{i,n}]^2 = \sigma_{A_{i,T}}^2 + E[A_{i,T}]^2$$

$$E[A_{i,T}] = \lambda_i T m_i p_i \Rightarrow E[A_{i,T}]^2 = (\lambda_i T m_i p_i)^2 \sigma_{A_{i,T}}^2 = \lambda_i T E[J_i^2]$$

Calculons  $E[J_i^2]$

On a :  $E[J_i^2] = \sigma_{J_i}^2 + E[J_i]^2$

Or  $E[J_i] = m_i p_i$  et  $\sigma_{J_i}^2 = m_i p_i (1 - p_i)$

Donc :

$$E[J_i^2] = m_i p_i (1 - p_i) + (m_i p_i)^2 \text{ et } \sigma_{A_{i,T}}^2 = \lambda_i T (m_i p_i (1 - p_i) + (m_i p_i)^2)$$

Alors

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E[A_{i,n}^2] = E[A_{i,T}^2] = \lambda_i T (m_i p_i (1 - p_i) + (m_i p_i)^2) + (\lambda_i T m_i p_i)^2 \text{ tel que } i = 1, 2$$

2/ On calcule

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E[A_{1,n}]$$

et

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E[A_{2,n}]$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E[A_{i,n}] = E[A_{i,T}]$$

$$E[A_{i,T}] = \lambda_i T m_i p_i$$

3/ On calcule

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E[Y_{1,n}]$$

et  $\lim_{n \rightarrow \infty} E[Y_{2,n}]$  : correspondent aux  $E[Y_{1,T}]$  et  $E[Y_{2,T}]$  respectivement.  
 $E[Y_1]$  et  $E[Y_2]$  correspondent au nombre moyen de clients de la classe 1 et classe 2 respectivement qui ont été servis.

4/ On calcule  $\lim_{n \rightarrow \infty} E[D_{1,n}]$  en s'appuyant sur l'expression de  $D_{1,n}$   
 $\lim_{n \rightarrow \infty} D_{1,n} = D_{1,T}$ ,  $\lim_{n \rightarrow \infty} Y_{i,T,n} = Y_i$  qui est une V A

$$\begin{aligned} D_{1,T} &= Y_{1,T} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} \leq C_1)} + Y_{1,T} \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T}=0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C_1 + C_0)} \\ &+ (C_0 + C_1) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T}=0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1 + C_0)} + Y_{1,T} \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C - Y_{2,T})} \\ &+ (C - Y_{2,T}) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C - Y_{2,T})} + C_1 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1)} \end{aligned}$$

5/ On calcule  $\lim_{n \rightarrow \infty} E[D_{2,n}]$  en s'appuyant sur l'expression de  $D_{2,n}$   
 $\lim_{n \rightarrow \infty} D_{2,n} = D_{2,T}$  qui est une V A

$$D_2 = Y_{2,T} \times (1 - \mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)}) + C_0 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)}$$

5'/ On calcule :  $\lim_{n \rightarrow \infty} E[D_{2,n}^2] = E[D_{2,T}^2]$  :

$$E[D_{2,T}^2] = E[Y_{2,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq C_0)}] + C_0^2 \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)}]$$

6/ On calcule  $\lim_{n \rightarrow \infty} E[D_{2,n} Y_{2,n}] = E[D_2 Y_{2,T}]$  :

$$E[D_2 Y_{2,T}] = E[Y_{2,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq C_0)}] + C_0 \times E[(Y_{2,T}) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)}]$$

7/ On calcule  $\lim_{n \rightarrow \infty} E[D_{1,n} Y_{1,n}] = E[D_{1,T} Y_{1,T}]$

$$\begin{aligned} D_{1,n} Y_{1,n} &= Y_{1,n}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} \leq C_1)} + Y_{1,n}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n}=0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,n} \leq C_1 + C_0)} \\ &+ (C_0 + C_1) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n}=0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} > C_1 + C_0)} \times Y_{1,n} \\ &+ Y_{1,n}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,n} \leq C - Y_{2,n})} \\ &+ (C - Y_{2,n}) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} > C - Y_{2,n})} \times Y_{1,n} \\ &+ C_1 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} > C_1)} \times Y_{1,n} \end{aligned}$$

On en déduit que :

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} E[D_{1,n} Y_{1,n}] &= E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} \leq C_1)}] \\ &+ E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T}=0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C_1 + C_0)}] \\ &+ (C_0 + C_1) \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T}=0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1 + C_0)} \times Y_{1,T}] \\ &+ E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C - Y_{2,T})}] \\ &+ (C - Y_{2,T}) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C - Y_{2,T})} \times Y_{1,T}] \\ &+ C_1 \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1)} \times Y_{1,T}] \end{aligned}$$

8/ On calcule  $\lim_{n \rightarrow \infty} E [D_{1,n}^2]$  :

$$\begin{aligned}
D_{1,n}^2 &= Y_{1,n}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} \leq C_1)} \\
&+ Y_{1,n}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n}=0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,n} \leq C_1 + C_0)} \\
&+ (C_0 + C_1)^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n}=0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} > C_1 + C_0)} \\
&+ Y_{1,n}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,n} \leq C - Y_{2,n})} \\
&+ (C - Y_{2,n})^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} > C - Y_{2,n})} \\
&+ C_1^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,n} > C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,n} > C_1)}
\end{aligned}$$

Donc :

$$\begin{aligned}
\lim_{n \rightarrow \infty} E [D_{1,n}^2] &= E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} \leq C_1)}] + E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T}=0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C_1 + C_0)}] \\
&+ (C_0 + C_1)^2 \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T}=0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1 + C_0)}] \\
&+ E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C - Y_{2,T})}] \\
&+ E[(C - Y_{2,T})^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C - Y_{2,T})}] \\
&+ C_1^2 \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1)}]
\end{aligned}$$

On a :

$$\begin{aligned}
E [Y_{1,T}^2] + E [Y_{2,T}^2] &= \lim_{n \rightarrow \infty} E [A_{1,n}^2] \\
&+ \lim_{n \rightarrow \infty} E [D_{1,n}^2] + \lim_{n \rightarrow \infty} E [Y_{1,n}^2] - 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E [D_{1,n} Y_{1,n}] \\
&- 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E [D_{1,n}] \lim_{n \rightarrow \infty} E [A_{1,n}] \\
&+ 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E [A_{1,n}] \lim_{n \rightarrow \infty} E [Y_{1,n}] \\
&+ \lim_{n \rightarrow \infty} E [A_{2,n}^2] + \lim_{n \rightarrow \infty} E [D_{2,n}^2] + \lim_{n \rightarrow \infty} E [Y_{2,n}^2] \\
&+ 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E [A_{2,n} Y_{2,n}] - 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E [D_{2,n} Y_{2,n}] \\
&- 2 \lim_{n \rightarrow \infty} E [D_{2,n}] \lim_{n \rightarrow \infty} E [A_{2,n}]
\end{aligned}$$

Alors :

$$\begin{aligned}
0 &= \lambda_1 T(m_1 p_1(1 - p_1) + (m_1 p_1)^2) + (\lambda_1 T m_1 p_1)^2 + E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} \leq C_1)}] \\
&+ E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T}=0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C_1 + C_0)}] \\
&+ (C_0 + C_1)^2 \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T}=0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1 + C_0)}] + E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(0 < Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C - Y_{2,T})}] \\
&+ E[(C - Y_{2,T})^2 \times \mathbf{1}_{(0 < Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C - Y_{2,T})}] + C_1^2 \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1)}] \\
&- 2 \times E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} \leq C_1)}] + E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T}=0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C_1 + C_0)}] \\
&+ (C_0 + C_1) \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq 0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1 + C_0)} \times Y_{1,T}] + E[Y_{1,T}^2 \times \mathbf{1}_{(0 < Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C - Y_{2,T})}] \\
&+ (C - Y_{2,T}) \times \mathbf{1}_{(0 < Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C - Y_{2,T})} \times Y_{1,T}] + C_1 \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1)} \times Y_{1,T}] \\
&+ -2 \times (E[Y_{1,T} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} \leq C_1)}] + E[Y_{1,T} \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq 0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C_1 + C_0)}] \\
&+ (C_0 + C_1) \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq 0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1 + C_0)}] + E[Y_{1,T} \times \mathbf{1}_{(0 < Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(C_1 < Y_{1,T} \leq C - Y_{2,T})}] \\
&+ E[(C - Y_{2,T}) \times \mathbf{1}_{(0 < Y_{2,T} \leq C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C - Y_{2,T})}] \\
&+ C_1 \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)} \times \mathbf{1}_{(Y_{1,T} > C_1)}]) \times \lambda_1 T m_1 p_1 + 2 \times \lambda_1 T m_1 p_1 \times E[Y_{1,T}] \\
&+ \lambda_2 T(m_2 p_2(1 - p_2) + (m_2 p_2)^2) + (\lambda_2 T m_2 p_2)^2 + E[Y_{2,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq C_0)}] \\
&+ C_0^2 \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)}] + 2 \times \lambda_2 T m_2 p_2 \times E[Y_{2,T}] - 2(E[Y_{2,T}^2 \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} \leq C_0)}] \\
&+ C_0 \times E[(Y_{2,T}) \times \mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)}]) - 2 \times (E[Y_{2,T} \times (\mathbf{1}_{Y_{2,T} \leq C_0})] + (C_0) \times E[\mathbf{1}_{(Y_{2,T} > C_0)}]) \times \lambda_2 T m_2 p_2
\end{aligned}$$



# Annexe D

## Lois d'arrivées

### D.1 Distribution hyper-exponentielle

Une distribution hyper-exponentielle d'ordre  $k$  est définie par :

- $k$  variables aléatoires indépendantes exponentiellement distribuées  $X_1, \dots, X_k$  de paramètres  $\mu_1 = \frac{1}{\lambda_1}, \dots, \mu_k = \frac{1}{\lambda_k}$ , respectivement.
- Une distribution de probabilité discrète  $p_1, \dots, p_k$  indépendante de la distribution de probabilité des  $X_i, i = 1, \dots, k$ , avec

$$\sum_{i=1}^k p_i = 1$$

La variable aléatoire hyper-exponentielle sera notée  $X_I$ . La distribution de probabilité est donnée par :

$$P\{X_I \leq t\} = 1 - \sum_{i=1}^k p_i e^{-\mu_i t}$$

$$\frac{d}{dt} P\{X_I \leq t\} = \sum_{i=1}^k p_i \mu_i e^{-\mu_i t}$$

Le temps inter-arrivée moyen est donné par

$$E[X_I] = \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i}$$

Le moment du second ordre est donné par :

$$E[X_I^2] = 2 * \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i^2}$$

Le coefficient de variation de cette loi de distribution est supérieur à 1.

La distribution de probabilité d'une variable aléatoire hyper-exponentielle est obtenue suite à un choix aléatoire d'une loi exponentielle parmi  $n$ . Notons  $\{X_i, 1 \leq i \leq n\}$ ,  $n$  lois exponentielles indépendantes de paramètres respectifs  $(\lambda_i, 1 \leq i \leq n)$  :  $X_i \sim \mathcal{E}(\lambda_i)$ .

Les paramètres de choix de la variable sont notés  $(p_i, 1 \leq i \leq n)$  et vérifient :

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1,$$

Alors la loi de  $Y$  peut être obtenue de la manière suivante : on tire avec probabilité  $p_i$  le paramètre  $\lambda_i$  que l'on prendra pour la loi exponentielle  $\mathcal{E}(\lambda_i)$  que suivra  $Y$ .

On obtient ainsi une loi hyper-exponentielle de paramètres "n",  $(p_i), (\lambda_i)$ . Cette loi sera notée :

$$Y \sim \mathcal{H}_n((p_i), (\lambda_i))$$

. Dans le cas où  $k = 2$   $p_1 = 1 - p_2$

Le temps interarrivée moyen est donné par

$$E[X_I] = \sum_{i=1}^2 \frac{p_i}{\mu_i}$$

Le moment du second ordre est donné par :

$$E[X_I^2] = 2 * \sum_{i=1}^2 \frac{p_i}{\mu_i^2}$$

La variance de  $X_I$  est donnée par

$$\sigma_{X_I}^2 = 2 \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i^2} - \left( \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i} \right)^2$$

Le coefficient de variation de  $X_I$

$$C_{X_I}^2 = \frac{\sigma_{X_I}^2}{(E[X_I])^2} = \frac{E[X_I^2] - (E[X_I])^2}{(E[X_I])^2}$$

$$C_{X_I}^2 = \frac{2 \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i^2}}{\left( \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_i} \right)^2} - 1$$

## D.2 Distribution d'Erlang d'ordre k

Une variable aléatoire  $X$  qui suit une distribution d'Erlang d'ordre  $k$  est la somme de  $k$  variables aléatoires indépendantes exponentiellement distribuées de paramètres  $\mu_i, i = 1, \dots, k$ . Le temps de service moyen est donné par :

$$E[X] = \sum_{i=1}^k E[X_i] = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\mu_i}$$

Le moment du second ordre est donné par :

$$E[X_I^2] = k * E[X]^2$$

avec

La variance de  $X_I$  est donnée par

$$\sigma_X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\mu_i^2}$$

Le coefficient de variation de  $X_I$

$$C_X = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k \frac{1}{\mu_i^2}}}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{\mu_i}}$$

Le coefficient de variation de cette loi de distribution est inférieur à 1. La distribution d'Erlang avec le paramètre  $k = 1$  est une simple distribution exponentielle (arrivée Poisson).

Nous choisissons la loi d'Erlang d'ordre 2 ( $k=2$ ).





# Bibliographie

- [1] 3. T. 36.300, *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 14)*, 2016.
- [2] 5GAMERICAS, “Wireless technology evolution towards 5g : 3gpp release 13 to release 15 and beyond”, 2017.
- [3] 3. T. 36.300, *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 14)*, 2017.
- [4] 3. T. R. W. M. #84, *Geo Based Resource Scheduling for V2V Communication*, 2016.
- [5] 3. T. R. W. M. #85, *R1-164961 - Geo-based Resource Allocation for V2V*, 2016.
- [6] T. SPECIFICATION, “ETSI TS 123 285 V14.2.0 - Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Architecture enhancements for V2X services (3GPP TS 23.285 version 14.2.0 Release 14)”, t. 0, p. 1-36, 2017.
- [7] S. CHEN, J. HU, Y. SHI, Y. PENG, J. FANG, R. ZHAO et L. ZHAO, “Vehicle-to-Everything (v2x) Services Supported by LTE-Based Systems and 5G”, *IEEE Communications Standards Magazine*, t. 1, n° 2, p. 70-76, 2017, ISSN : 2471-2825. DOI : 10 . 1109 / MCOMSTD . 2017 . 1700015. adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7992934/>.
- [8] C. MOBILE LI FENG, L. YUAN, D. TELECOMJIAYI FANG, L. ZHAO, D. TELEKOM, H. SAID TATESH, P. SYROS, J. WANG, J. GAO, I. DARIO SABELLA, L. GOMES BALTAR, N. IAN GARCIA, N. KRISHNAMURTHY, H. XU, U. PUETZSCHLER, L. KI-DONG LEE, J. KIM, O. BRUNO SCHUFFENECKER, C. HARTMANN et T. ITALIA, “V2X White Paper by NGMN Alliance”, adresse : <https://www.ngmn.org/fileadmin/ngmn/content/downloads/Technical/>

- 2018/V2X%7B%5C\_%7Dwhite%7B%5C\_%7Dpaper%7B%5C\_%7Dv1%7B%5C\_%7D0.pdf.
- [9] 3. T. 21.914, *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 14 Description; Summary of Rel-14 Work Items (Release 14)*, 2018.
- [10] T. SPECIFICATION et E. UNIVERSAL, “TS 136 213 - V13.3.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 14.2.0 Release 14)”, t. 0, 2017.
- [11] G. ARANITI, C. CAMPOLO, M. CONDOLUCI, A. IERA et A. MOLINARO, “LTE for Vehicular Networking : A Survey | Giuseppe Araniti - Academia.edu”, t. 51, n° 5, p. 148-157, 2013. adresse : [https://www.academia.edu/3509729/LTE%7B%5C\\_%7Dfor%7B%5C\\_%7DVehicular%7B%5C\\_%7DNetworking%7B%5C\\_%7DA%7B%5C\\_%7DSurvey](https://www.academia.edu/3509729/LTE%7B%5C_%7Dfor%7B%5C_%7DVehicular%7B%5C_%7DNetworking%7B%5C_%7DA%7B%5C_%7DSurvey).
- [12] G. ARANITI, C. CAMPOLO, M. CONDOLUCI, A. IERA et A. MOLINARO, “LTE for vehicular networking : a survey”, *IEEE communications magazine*, t. 51, n° 5, p. 148-157, 2013.
- [13] M. NOOR-A-RAHIM, Z. LIU, H. LEE, G. M. N. ALI, D. PESCH et P. XIAO, “A Survey on Resource Allocation in Vehicular Networks”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020.
- [14] A. MASMOUDI, K. MNIF et F. ZARAI, “A survey on radio resource allocation for V2X communication”, *Wireless Communications and Mobile Computing*, t. 2019, 2019.
- [15] 3GPP, “TS 136 321 - V14.3.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (3GPP TS 36.321 version 14.3.0 Release 14)”, t. 0, p. 0–34, 2017.
- [16] R. MOLINA-MASEGOSA et J. GOZALVEZ, “System Level Evaluation of LTE-V2V Mode 4 Communications and Its Distributed Scheduling”, *IEEE Vehicular Technology Conference*, t. 2017-June, 2017, ISSN : 15502252. DOI : 10.1109/VTCSpring.2017.8108463.
- [17] A. NABIL, V. MAROJEVIC, K. KAUR et C. DIETRICH, “Performance Analysis of Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling in C-V2X Networks”, p. 4-8, 2018. arXiv : 1804.10788. adresse : <http://arxiv.org/abs/1804.10788>.
- [18] M. GONZALEZ-MARTIN, M. SEPULCRE, R. MOLINA-MASEGOSA et J. GOZALVEZ, “Analytical Models of the Performance of C-V2X Mode 4 Vehicular Communications”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, n° October, 2018, ISSN : 00189545. DOI : 10.1109/TVT.2018.2888704.

- [19] M. O. MUGHAL, H. N. MAHJOUR, S. DAS, B. TOGHI, J. RAO, M. SAIFUDDIN et Y. P. FALLAH, "Multiple Access in Cellular V2X : Performance Analysis in Highly Congested Vehicular Networks", n° September, p. 1-8, 2019. DOI : 10.1109/vnc.2018.8628416.
- [20] R. MOLINA-MASEGOSA et J. GOZALVEZ, "LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications : A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, t. 12, n° 4, p. 30-39, 2017, ISSN : 15566072. DOI : 10.1109/MVT.2017.2752798.
- [21] X. HE, J. LV, J. ZHAO, X. HOU et T. LUO, "Design and Analysis of a Short Term Sensing Based Resource Selection Scheme for C-V2X Networks", *IEEE Internet of Things Journal*, 2020.
- [22] J. HE, Z. TANG, Z. FAN et J. ZHANG, "Enhanced collision avoidance for distributed LTE vehicle to vehicle broadcast communications", *IEEE Communications Letters*, t. 22, n° 3, p. 630-633, 2018, ISSN : 10897798. DOI : 10.1109/LCOMM.2018.2791399.
- [23] L. GALLO et J. HÄRRI, "Vehicular Safety Critical Communications : a Case Study for Unsupervised LTE D2D", 2016.
- [24] L. GALLO et J. HÄRRI, "Unsupervised Long- Term Evolution Device-to-Device : A Case Study for Safety-Critical V2X Communications", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, t. 12, n° 2, p. 69-77, 2017, ISSN : 15566072. DOI : 10.1109/MVT.2017.2669346.
- [25] G. LI, Z. YANG, S. CHEN, Y. LI et P. YUAN, "A Traffic Flow-based and Dynamic Grouping-enabled Resource Allocation Algorithm for LTE-D2D Vehicular Networks", 2016.
- [26] Z. XIGUANG, S. YONG et L. XIAOBO, "Research on Overlay D2D Resource Scheduling Algorithms for V2V Broadcast Service", p. 2-6, 2016.
- [27] G. CECCHINI, A. BAZZI, B. M. MASINI et A. ZANELLA, "Localization-based resource selection schemes for network-controlled LTE-V2V", *Proceedings of the International Symposium on Wireless Communication Systems*, t. 2017-Augus, p. 396-401, 2017, ISSN : 21540225. DOI : 10.1109/ISWCS.2017.8108147.
- [28] G. CECCHINI, A. BAZZI, M. MENARINI, B. M. MASINI et A. ZANELLA, "Maximum Reuse Distance Scheduling for Cellular-V2X Sidelink Mode 3", 2018.
- [29] L. LIANG, S. XIE, G. Y. LI, Z. DING et X. YU, "Graph-Based Radio Resource Management for Vehicular Networks", *IEEE International Conference on Communications*, t. 2018-May, 2018, ISSN : 15503607. DOI : 10.1109/ICC.2018.8422585. arXiv : 1801.02679.

- [30] G. CECCHINI, A. BAZZI, B. M. MASINI et A. ZANELLA, “MAP-RP : Map-based Resource Reselection Procedure for Autonomous LTE-V2V”, 2017.
- [31] J. KIM, J. LEE, S. MOON et I. HWANG, “A Position-based Resource Allocation Scheme for V2V Communication”, *Wireless Personal Communications*, t. 98, n° 1, p. 1569-1586, 2018, ISSN : 1572834X. DOI : 10.1007/s11277-017-4935-3.
- [32] 3. T. R. W. M. #84, *R1-160432 - Intel - V2V Sensing*, 2016.
- [33] 3. T.-R. W. #84BIS, *R1-163032\_QC\_V2V\_Sensing*, 2016.
- [34] L. F. ABANTO-LEON, A. KOPPELAAR et S. HEEMSTRA DE GROOT, “Network-assisted resource allocation with quality and conflict constraints for V2V communications”, *IEEE Vehicular Technology Conference*, t. 2018-June, p. 1-5, 2018, ISSN : 15502252. DOI : 10.1109/VTCSpring.2018.8417745.
- [35] A. MASMOUDI, S. FEKI, K. MNIF et F. ZARAI, “Radio Resource Allocation Algorithm for Device to Device based on LTE-V2X Communications.”, in *ICETE (1)*, 2018, p. 431-437.
- [36] A. MASMOUDI, S. FEKI, K. MNIF et F. ZARAI, “Efficient scheduling and resource allocation for D2D-based LTE-V2X communications”, in *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, IEEE, 2019, p. 496-501.
- [37] A. MASMOUDI, S. FEKI, K. MNIF et F. ZARAI, “A Mixed Traffic Sharing and Resource Allocation for V2X Communication”, in *International Conference on E-Business and Telecommunications*, Springer, 2019, p. 219-233.
- [38] Y. HOU, X. WU, X. TANG, X. QIN et M. ZHOU, “Radio Resource Allocation and Power Control Scheme in V2V Communications Network”, *IEEE Access*, t. 9, p. 34 529-34 540, 2021.
- [39] E. RASTOGI, M. K. MAHESHWARI, A. ROY, N. SAXENA et D. R. SHIN, “A novel safety message dissemination framework in LTE-V2X system”, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, e4275, 2021.
- [40] J. YANG, B. PELLETIER et B. CHAMPAGNE, “Enhanced Autonomous Resource Selection for LTE-Based V2V Communication”, p. 0-5, 2016.
- [41] X. GU et Y. DING, “A dynamic geo-based resource selection algorithm for LTE-V2V communications”, *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, t. 2018, n° 1, 2018, ISSN : 16871499. DOI : 10.1186/s13638-018-1194-2.
- [42] R. MOLINA-MASEGOSA, M. SEPULCRE et J. GOZALVEZ, “Geo-based scheduling for C-V2X networks”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, t. 68, n° 9, p. 8397-8407, 2019.

- [43] M. I. ASHRAF, M. BENNIS, C. PERFECTOD et W. SAAD, “Dynamic proximity-aware resource allocation in vehicle-to-vehicle (V2V) communications”, *2016 IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2016 - Proceedings*, 2016. DOI : 10.1109/GLOCOMW.2016.7848885. arXiv : arXiv:1609.03717v1.
- [44] T. SAHIN et M. BOBAN, “Radio resource allocation for reliable out-of-coverage V2V communications”, *IEEE Vehicular Technology Conference*, t. 2018-June, p. 1-5, 2018, ISSN : 15502252. DOI : 10.1109/VTCSpring.2018.8417747.
- [45] N. YU, J. MEI, L. ZHAO, K. ZHENG et H. ZHAO, “Radio resource allocation for D2D-based V2V communications with Lyapunov optimization”, in *2017 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, IEEE, 2017, p. 1-6.
- [46] A. MANSOURI, V. MARTINEZ et J. HÄRRI, “A first investigation of congestion control for LTE-V2X mode 4”, in *WONS 2019, 15th IEEE Wireless On-demand Network systems and Services Conference*, 2019.
- [47] A. SOUA et S. TOHME, “Multi-level SDN with vehicles as fog computing infrastructures : A new integrated architecture for 5G-VANETs”, in *2018 21st Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks and Workshops (ICIN)*, IEEE, 2018, p. 1-8.
- [48] H. PENG, Q. YE et X. SHEN, “SDN-based resource management for autonomous vehicular networks : A multi-access edge computing approach”, *arXiv preprint arXiv :1809.08966*, 2018.
- [49] S. K. TAYYABA et M. A. SHAH, “Resource allocation in SDN based 5G cellular networks”, *Peer-to-Peer Networking and Applications*, t. 12, n° 2, p. 514-538, 2019.
- [50] 3. G. P. P. (3GPP), “3rd Generation Partnership Project, TS 23.287 V17.1.0 : 3rd Generation Partnership Project ; Technical Specification Group Services and System Aspects; Architecture enhancements for 5G System (5GS) to support Vehicle-to-Everything (V2X) services (Release 17)”, 2021.
- [51] H. JI, S. PARK, J. YEO, Y. KIM et J. LEE, “Ultra Reliable and Low Latency Communications in 5G Downlink : Physical Layer Aspects Ultra Reliable and Low Latency Communications in 5G Downlink : Physical Layer Aspects”,
- [52] NI, “5G New Radio : Introduction to the Physical Layer”, *National Instruments*, p. 27, 2018. adresse : [ni.com/5g/nr](http://ni.com/5g/nr).
- [53] J. SACHS, G. WIKSTROM, T. DUDDA, R. BALDEMAIR et K. KITTICHOKECHAI, “5G radio network design for ultra-reliable low-latency communication”, *IEEE network*, t. 32, n° 2, p. 24-31, 2018.

- [54] H. JI, S. PARK, J. YEO, Y. KIM, J. LEE et B. SHIM, “Ultra-reliable and low-latency communications in 5G downlink : Physical layer aspects”, *IEEE Wireless Communications*, t. 25, n° 3, p. 124-130, 2018.
- [55] N. INSTRUMENTS, “5G New Radio : Introduction à la couche physique”,
- [56] H. JI, S. PARK, J. YEO, Y. KIM, J. LEE et B. SHIM, “Ultra-Reliable and Low-Latency Communications in 5G Downlink : Physical Layer Aspects”, *IEEE Wireless Communications*, t. 25, n° 3, p. 124-130, 2018, ISSN : 15361284. DOI : 10.1109/MWC.2018.1700294.
- [57] J. SACHS, G. WIKSTROM, T. DUDDA, R. BALDEMAIR et K. KITTICHOKECHAI, “5G Radio Network Design for Ultra-Reliable Low-Latency Communication”, *IEEE Network*, t. 32, n° 2, p. 24-31, 2018, ISSN : 08908044. DOI : 10.1109/MNET.2018.1700232.
- [58] B. SAYADI, M. GRAMAGLIA, V. FRIDERIKOS, D. VON HUGO, P. ARNOLD, M.-L. ALBERI-MOREL, M. A. PUENTE, V. SCIANCALEPORE, I. DIGON et M. R. CRIPPA, “SDN for 5G Mobile Networks : NORMA perspective”, in *International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks*, Springer, 2016, p. 741-753.
- [59] NGMN, “Description of Network Slicing Concept”, *NGMN 5G Project Requirements & Architecture – Work Stream E2E Architecture*, t. 1, n° January, p. 1-7, 2016.
- [60] 3. G. P. P. (3GPP), “TR23.799, v0.7.0 : Technical specification group services and system aspects; study on architecture for next generation system Project”, 2016.
- [61] ONF, “SDN Architecture for Transport Networks”, *ONF White Paper*, p. 17, 2016.
- [62] T. TALEB, B. MADA, M.-I. CORICI, A. NAKAO et H. FLINCK, “PERMIT : Network slicing for personalized 5G mobile telecommunications”, *IEEE Communications Magazine*, t. 55, n° 5, p. 88-93, 2017.
- [63] R. RAVINDRAN, A. CHAKRABORTI, S. O. AMIN, A. AZGIN et G. WANG, “5G-ICN : Delivering ICN services over 5G using network slicing”, *IEEE Communications Magazine*, t. 55, n° 5, p. 101-107, 2017.
- [64] K. KATSALIS, N. NIKAEIN, E. SCHILLER, A. KSENTINI et T. BRAUN, “Network slices toward 5G communications : Slicing the LTE network”, *IEEE Communications Magazine*, t. 55, n° 8, p. 146-154, 2017.
- [65] X. ZHOU, R. LI, T. CHEN et H. ZHANG, “Network slicing as a service : enabling enterprises’ own software-defined cellular networks”, *IEEE Communications Magazine*, t. 54, n° 7, p. 146-153, 2016.

- [66] S. REDANA, A. KALOXYLOS, A. GALIS, P. ROST et V. JUNGNICHEL, “View on 5g architecture”, *White paper of the 5G-PPP architecture WG*, 2016.
- [67] 3. G. P. P. (3GPP), “Technical specification group services and system aspects; telecommunication management; study on management and orchestration of network slicing for next generation network (release 15)”, 2017.
- [68] “5G PPP use cases and performance evaluation models”, *5G Infrastructure Public Private Partnership V1.0*, p. 1-39, 2016.
- [69] C. CAMPOLO, A. MOLINARO, A. IERA et F. MENICHELLA, “5G network slicing for vehicle-to-everything services”, *IEEE Wireless Communications*, t. 24, n° 6, p. 38-45, 2017.
- [70] 3. G. P. P. (3GPP), “TR 22.885 : technical specification group services and system aspects; study on LTE support for vehicle to everything (V2X) services (release 14)”, 2015.
- [71] 3. G. P. P. (3GPP), “3rd Generation Partnership Project, “Ts 23.285 v15.1.0 : Technical specification group services and system aspects; architecture enhancements for V2X services, (release 15)”, 2018.
- [72] 3. G. P. P. (3GPP), “3rd Generation Partnership Project ;Technical Specification Group Services and System Aspects; Architecture enhancements for V2X services (Release 16)”, 2020.
- [73] C. CAMPOLO, A. MOLINARO, A. IERA, R. R. FONTES et C. E. ROTHENBERG, “Towards 5G network slicing for the V2X ecosystem”, in *2018 4th IEEE conference on network softwarization and workshops (NetSoft)*, IEEE, 2018, p. 400-405.
- [74] S. MOON, S. BAE et I. HWANG, “Vehicle MIMO System for High Reliability and Low Latency in NR-based eV2X”, n° c, p. 32-36, 2018.
- [75] S. SAMARAKOON, M. BENNIS, W. SAAD et M. DEBBAH, “Federated learning for ultra-reliable low-latency V2V communications”, in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, IEEE, 2018, p. 1-7.
- [76] Y. HAN, S. E. ELAYOUBI, A. GALINDO-SERRANO, V. S. VARMA et M. MESSAI, “Periodic radio resource allocation to meet latency and reliability requirements in 5G networks”, in *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, IEEE, 2018, p. 1-6.
- [77] H. CHEN, J. WU et T. SHIMOMURA, “New reference signal design for URLLC and eMBB multiplexing in new radio wireless communications”, in *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, IEEE, 2018, p. 1220-1225.



- [78] G. POCOVI, M. LAURIDSEN, B. SORET, K. I. PEDERSEN et P. MOGENSEN, “Ultra-reliable communications in failure-prone realistic networks”, in *2016 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, IEEE, 2016, p. 414-418.
- [79] M. A. SIDDIQI, H. YU et J. JOUNG, “5G ultra-reliable low-latency communication implementation challenges and operational issues with IoT devices”, *Electronics*, t. 8, n° 9, p. 981, 2019.
- [80] J. MEI, K. ZHENG, L. ZHAO, Y. TENG et X. WANG, “A latency and reliability guaranteed resource allocation scheme for LTE V2V communication systems”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, t. 17, n° 6, p. 3850-3860, 2018.
- [81] Z. ZHOU, R. RATASUK, N. MANGALVEDHE et A. GHOSH, “Resource allocation for uplink grant-free ultra-reliable and low latency communications”, in *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, IEEE, 2018, p. 1-5.
- [82] M. SHI, Y. TANG, X. ZHANG, Y. ZHANG et J. XU, “Modeling and simulation of packet delivery rate in LTE-V network based on Markov chain”, *Tsinghua Science and Technology*, t. 25, n° 3, p. 357-367, 2019.
- [83] L. S. TOHMÉ R. Naja, “Evaluation des performances et dimensionnement de réseaux”, 2010.
- [84] W. FELLER, *An introduction to probability theory and its applications, vol 2*. John Wiley & Sons, 2008.
- [85] P. FLAJOLET et R. SEDGEWICK, *Analytic combinatorics*. Cambridge University Press, 2009.
- [86] “Relations entre coefficients et racines”, adresse : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Relations\\_entre\\_coefficients\\_et\\_racines](https://fr.wikipedia.org/wiki/Relations_entre_coefficients_et_racines).



**Titre :** Gestion intelligente des ressources radios dans les réseaux véhiculaires de la 4G vers la 5G

**Mots clés :** réseaux véhiculaires, Allocation des ressources radios, Communications V2X, réseaux LTE-V, réseaux 5G

**Résumé :** Les réseaux véhiculaires constituent une classe de réseaux mobiles à part entière présentant l'originalité de permettre aux véhicules de communiquer les uns avec les autres dans le cadre d'une mobilité spatiale élevée ainsi qu'avec les réseaux cellulaires et les réseaux de communication déployés sur l'infrastructure routière. En vue de supporter les communications des véhicules autonomes de niveau 5, ces réseaux doivent offrir une QoS adaptée aux contraintes temporelles critiques des communications tout en garantissant un haut niveau d'intégrité des données échangées. La technologie LTE utilisée dans les réseaux mobiles cellulaires et qui est dotée d'un cadre rigoureux de QoS a été choisie par le 3GPP (Release 14) pour la communication dans les réseaux véhiculaires sous la référence LTE-V2X/ cellular V2X. La Release 14 introduit deux modes (3,4) de communication LTE spécialement conçus pour les communications V2V. Dans le mode 3, la sélection des canaux radios est gérée par la station de base eNodeB. Dans le mode 4, les véhicules sélectionnent leurs ressources radio d'une manière autonome indépendamment de toute couverture du réseau cellulaire. Dans la littérature, différents algorithmes d'allocation de ressources pour les modes 3 et 4 ont été proposés. Dans la première partie de la thèse, on s'intéresse au mode 3 qui répond aux besoins du monitoring des véhicules autonomes de niveau 5 par l'infrastructure déployée sur la route et dans le Cloud. Une étude exhaustive des propositions existantes dans littérature montre que la majorité des solutions proposées ne traitent que les messages périodiques (non-safety ex. CAM) tout en assurant un minimum de sécurité. Donc, nous avons introduit les messages apériodiques (safety ex. DENM) qui sont générés dans des situations critiques (accident, bouchon). Nous avons proposé une politique d'allocation des ressources basée sur un système de priorité avec la garantie stricte d'une

capacité minimale pour les applications critiques et un partage dynamique de la capacité restante avec les autres applications. Nous avons proposé également une nouvelle technique de réutilisation des ressources pour les deux types de messages (critiques et moins critiques) qui permet d'utiliser efficacement la capacité du réseau tout en satisfaisant les exigences des applications critiques sans pénaliser les applications moins critiques. La technologie LTE-V présente une étape importante vers le réseau V2X/5G. Ce réseau 5G offre, par le biais de l'URLLC, une haute intégrité et une faible latence pour les applications temps réel critiques. De plus, avec le concept du « Network Slicing », l'architecture fonctionnelle du réseau 5G offre la portabilité du réseau véhiculaire avec ses services à côté d'autres réseaux de services au sein du réseau mobile 5G. Nous avons choisi d'intégrer l'architecture du réseau véhiculaire 5G dans un même slice au niveau du réseau d'accès ce qui permet de bénéficier du gain statistique en termes de l'utilisation des ressources radios. On s'est intéressé aux couches MAC et physique NR. Nous avons étudié l'allocation dynamique des ressources radios entre les communications URLLC critiques et les communications de streaming portés dans un même Slice. L'ordonnanceur utilisé pour l'allocation des ressources est spécifié pour gérer dynamiquement les ressources spectrales entre les flux URLLC critiques et les flux de streaming échangés entre véhicules et les serveurs d'applications. Nous avons proposé plusieurs modèles statistiques de flux échangés et analysé par simulation la QoS offerte dans le réseau d'accès aux flux critiques/streaming. Nous avons également proposé un modèle analytique markovien quasi-exact de la traversée des couches MAC/Physique du flux URLLC avec comme objectif de dimensionner un mécanisme de contrôle d'admission (CAC) des flux critiques dans le slice et de garantir la QoS requise par ces flux.

Université Paris-Saclay

Maison du doctorat de l'Université Paris-Saclay, 2ème étage aile ouest, Ecole normale supérieure Paris-Saclay, 4 avenue des Sciences, 91190 Gif sur Yvette, France

**Title :** Intelligent radio resource management in vehicular networks from 4G to 5G

**Keywords :** Vehicular networks, Radio resource allocation, V2X communications, LTE-V networks, 5G networks

**Abstract :** Vehicular networks are a class of mobile networks allowing vehicles to communicate with each other in the context of high spatial mobility, as well as with cellular networks and communication networks deployed on the road infrastructure. In order to support Level 5 autonomous vehicle communications, these networks need to provide a QoS that addresses the time-critical constraints of communications while ensuring a high level of integrity of the data exchanged. The LTE technology, used in cellular mobile networks with a strict QoS, has been selected by 3GPP (Release 14) for communication in vehicular networks under the reference LTE-V2X/ cellular V2X. Release 14 introduces two modes (3,4) of LTE communication specifically designed for V2V communication. In mode 3, radio channel selection is managed by the eNodeB base station. In Mode 4, vehicles select their radio resources autonomously regardless of any cellular network coverage. In the literature, different resource allocation algorithms for modes 3 and 4 have been proposed. In the first part of the thesis, we focus on mode 3 addressing the requirements of monitoring level 5 autonomous vehicles through the infrastructure deployed on the road and in the Cloud. An exhaustive study of the existing proposals in the literature shows that the majority of the proposed solutions only deal with periodic messages (non-safety e.g. CAM) while ensuring a minimum of security. Therefore, we introduced aperiodic messages (safety ex. DENM) which are generated in critical situations (accident, traffic jam). We proposed a resource allocation policy based on a priority system with a strict guarantee of minimum capacity for critical applications and a dynamic sha-

ring of the remaining capacity with other applications. We also proposed a new resource reuse technique for both types of messages (critical and less critical) that allows efficient use of network capacity while satisfying the requirements of critical applications without affecting less critical applications. LTE-V technology presents an important step towards the V2X/5G network. This 5G network offers, through URLLC, high integrity and low latency for real-time critical applications. Furthermore, with the concept of "Network Slicing", the functional architecture of the 5G network offers the portability of the vehicular network with its services alongside other service networks within the 5G mobile network. We have chosen to integrate the 5G vehicular network architecture in the same slice at the access network level which allows to benefit from the statistical gain in terms of radio resources utilization. We focused on the MAC and physical NR layers. We studied the dynamic allocation of radio resources between critical URLLC communications and streaming communications carried in the same Slice. The scheduler used for resource allocation is specified to dynamically manage spectral resources between critical URLLC flows and streaming flows exchanged between vehicles and application servers. We proposed several statistical models of exchanged flows and analyzed by simulation the QoS offered in the access network to critical/streaming flows. We have also proposed a quasi-exact Markovian analytical model of the MAC/Physical layer traversal of the URLLC flow with the objective of dimensioning an admission control mechanism (CAC) of the critical flows in the slice and to guarantee the QoS required by these flows.