

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderahmane Mira de Béjaïa

Faculté des Sciences Exactes

Département de Recherche Opérationnelle



Mémoire de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du Diplôme de

Master en Recherche Opérationnelle

Optimisation et Fiabilité des Réseaux de Communication

Thème

Modélisation des tentatives d'accès au canal sans fil radio cognitive

Réalisé par :

TACHERAFT Sarah

Devant le jury composé de :

	Nom	Institution
Présidente	Pr. BOULFEKHAR Samra	Univ. de Béjaïa
Examinatrice	Dr. SAIT Razika	Univ. de Béjaïa
Examinatrice	Dr. BAZIZI Lydia	Univ. de Béjaïa
Encadrant	Pr. ADEL-AISSANOU Karima	Univ. de Béjaïa
Encadrant	Pr. LEKADIR Ouiza	Univ. de Béjaïa

Béjaïa, Juin 2024.

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons tout d'abord à remercier Dieu, de nous avoir donné la santé, la volonté et la patience pour mener à terme notre formation de licence et pouvoir réaliser ce travail.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers mes encadrantes, Mme Ouiza LEKADIR et Mme Karima ADEL-AISSANOU, pour leur soutien indéfectible, leurs conseils avisés et leur confiance inébranlable tout au long de ce projet. Leurs précieuses contributions ont grandement enrichi mon travail et ont été une source d'inspiration constante.

Mes remerciements sont aussi adressés aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger mon travail.

Je remercie également tous les enseignants du département de Recherche Opérationnelle qui nous ont permis d'améliorer notre formation.

Enfin, je n'oublie pas de remercier ceux qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre à élaborer ce travail.

✧ *Dédicaces* ✧

Je dédie ce travail

** À mes très chers parents ;*

** À mon frère Omar et ma sœur Lina.*

✧ Sarah Tacheraft ✧

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iv
Liste des Abréviations	1
Introduction générale	1
1 La radio cognitive	5
1.1 Historique	5
1.2 Définition	6
1.3 Architecture	6
1.3.1 Les Utilisateurs Primaires (PU_s)	7
1.3.2 Les Utilisateurs Secondaires (SU_s)	7
1.4 Composants de la radio cognitive	7
1.5 Domaines d'application de la radio cognitive	8
1.6 Position du Problème	9
2 Files d'attente avec rappels	11
2.1 Files d'attente classiques	11
2.1.1 Description d'un système de files d'attente classique	11
2.2 Caractéristiques de base d'un système d'attente	12
2.2.1 Le processus d'arrivée des clients au système	12
2.2.2 Le processus de service	12
2.2.3 Le nombre de serveurs	12
2.2.4 La capacité de la file du système	13
2.2.5 La discipline de service	13
2.3 Notation de Kendall	13

2.4	Objet de la théorie des files d'attente	14
2.5	Formule de Little	14
2.6	Chaînes de Markov	15
2.7	Systèmes de files d'attente markoviens	15
2.8	Systèmes de files d'attente non markoviens	15
2.9	Systèmes de files d'attente avec rappels	16
2.9.1	Description d'un système de file d'attente avec rappels	16
2.9.2	Politiques de rappels	17
2.9.3	Les principales mesures de performance du modèle M/M/1 avec rappels classiques	17
3	Quelques travaux modélisant la Radio Cognitive (RC)	19
3.1	Radio Cognitive : Rendre les Radios Logicielles Plus Personnalisées	19
3.2	Radio Cognitive pour des Communications Multimédia Mobiles Flexibles	20
3.3	Radio Cognitive : Communications Sans Fil Renforcées par l'Intelligence	20
3.4	Communications sans fil	21
3.5	La technologie de la radio cognitive	21
3.6	Réseaux de Radio Cognitive	22
3.7	Modélisation et Analyse des Performances des Réseaux de Radio Cognitive en Utilisant RdPSC Chronométrés	22
3.8	Modélisation, analyse et évaluation des méthodes d'accès au médium dans les réseaux sans fil	23
3.9	Une file d'attente de réessai sur un seul serveur peu fiable avec des collisions et des erreurs de transmission	24
3.10	Allocation dynamique des bandes spectrales dans les réseaux sans-fil à radio cognitive	24
4	Modélisation de la Radio Cognitive par un système d'attente M/M/1 avec rappels et perte de clients	26
4.1	Modélisation	26
4.2	Description du modèle	27
4.3	Calcul de la distribution stationnaire	27
4.4	Caractéristiques du système	29
4.5	Illustrations numériques	29

5	Modélisation de la Radio Cognitive par un système d'attente $M/M/1$ avec rappels, perte de clients et erreurs de transmission	35
5.1	Description du modèle	36
5.2	Calcul de la distribution stationnaire	36
5.3	Caractéristiques du système	38
5.4	Illustrations numériques	38
	Conclusion générale	43
	Bibliographie	43

Table des figures

1	Organisation du mémoire.	4
1.1	Architecture de la radio cognitive	6
1.2	Composants de la radio cognitive	7
2.1	Schéma général d'un système de files d'attente avec rappels.	17
4.1	Diagramme de transition.	28
4.2	L_q en fonction de ε pour différentes valeurs de λ	30
4.3	L_q en fonction de μ pour différentes valeurs de λ	31
4.4	L_q en fonction du taux d'arrivée λ	32
4.5	W_q en fonction du taux d'arrivée λ	33
5.1	Diagramme de transition.	37
5.2	L_q en fonction de λ pour différentes valeurs de γ	39
5.3	L_q en fonction de μ pour différentes valeurs de γ	40

Liste des abréviations

- **QoS** : Qualité de Service
- **WiFi** : Réseau Local sans Fil
- **GSM** : Système Global de Communications Mobiles
- **FCC** : Commission Fédérale des Communications
- **SU** : Utilisateur Secondaire
- **PU** : Utilisateur Primaire
- **RC** : Radio Cognitive
- **RF** : Radio Fréquence
- **KTH** : Institut Royal de Technologie
- **FCFS** : Premier Arrivé, Premier Servi
- **LIFO** : Dernier Entré, Premier Sorti
- **SIRO** : Sélection dans un Ordre Aléatoire
- **PS** : Partage Équitable
- **LTO** : Temps Limite d'Opération
- **IOT** : Internet des Objets
- **SDR** : Radio Définie par Logiciel

Introduction générale

L'évolution des communications sans fil numériques a révélé un fait largement accepté : nos systèmes actuels ne tirent pas pleinement parti de toute la bande de fréquence (appelée aussi spectre) disponible. Les prochaines générations de systèmes sans fil devront donc exploiter intelligemment ces spectres inutilisés, en faisant preuve de capacités d'écoute et d'adaptation à leur environnement. Cette évolution technologique découle non seulement des besoins du moment, mais aussi des avancées techniques disponibles. En effet, nous sommes passés de la radio analogique à la radio numérique, avec des améliorations significatives en termes de qualité de service (QOS) : la vitesse et la fiabilité de transmission des données, ..., etc. Le développement de nouvelles technologies a également conduit à l'émergence de la radio logicielle, initialement envisagée pour des applications militaires mais rapidement étendue au domaine civil. Ceci étant les étapes principales de l'évolution des communications sans fil, la radio cognitive (radio intelligente) représente l'étape suivante de cette évolution, en réponse à la complexité croissante de notre environnement radio d'après la Commission Fédérale des Communications (FCC).

L'étude réalisée par la FCC a montré que certains spectres sont d'ores et déjà surchargés aux heures de pointe. Cependant, l'utilisation du spectre de fréquence n'est pas uniforme puisque il varie selon les heures de la journée et selon la position géographique. Ainsi, un spectre peut être surchargé pendant qu'un autre reste inutilisé. L'idée de la radio cognitive a donc naturellement émergée pour développer des outils permettant de mieux utiliser le spectre.

La saturation observée dans certaines bandes et réseaux, tels que le GSM et le WiFi aux heures de pointe, met en évidence le besoin pressant de mieux gérer et utiliser le spectre disponible d'où la nécessité de faire appel à la radio cognitive dont l'idée fondamentale est d'optimiser cette utilisation du spectre.

L'un des principaux défis dans la mise en œuvre de la radio cognitive est l'évaluation précise de ses performances. Pour évaluer ces performances, une bonne modélisation du système étudié est indispensable. Ainsi, on fait appel à des outils de modélisation

mathématique tels que la théorie des files d'attente, les réseaux de Petri, les chaînes de Markov, etc.

Dans ce mémoire on fait appel à l'outil des files d'attente pour modéliser la radio cognitive, car les systèmes de files d'attente permettent d'analyser et de prédire le comportement des paquets de données dans les réseaux de communication, fournissant ainsi des indices de performance essentiels tels que le temps d'attente, la probabilité de blocage et le taux de perte de paquets, etc. Les systèmes avec rappels sont largement utilisés dans l'étude des systèmes de communications voir [14, 15] Ainsi, on propose une modélisation via un système de file d'attente $M/M/1$ avec rappels pour la radio cognitive, où les utilisateurs secondaires (SU) rivalisent pour l'accès au spectre en utilisant un accès aléatoire aux canaux des utilisateurs primaires (PU).

Ce mémoire se compose d'une introduction générale, de cinq chapitres, d'une conclusion générale et d'une bibliographie.

Dans le premier chapitre, nous présentons la radio cognitive avec ses différentes fonctions. Dans le deuxième chapitre, nous décrivons les systèmes de files d'attente classiques en général ainsi que les systèmes avec rappels. Le troisième chapitre présente quelques travaux modélisant la Radio Cognitive. Le quatrième chapitre est la première contribution. Il concerne la modélisation de la radio cognitive par un système d'attente $M/M/1$ avec rappels et perte de clients. Nous avons appliqué la méthode des fonctions génératrices pour calculer certaines caractéristiques du système. Enfin, nous avons fourni quelques illustrations numériques pour démontrer l'impact de certains paramètres sur les performances du système. Le cinquième chapitre est la deuxième contribution. Il concerne la modélisation de la Radio Cognitive par un système d'attente $M/M/1$ avec rappels, perte de clients et erreurs de transmission. Nous appliquons la méthode des fonctions génératrices calculé certaines caractéristiques du système. Enfin, nous avons fourni quelques illustrations numériques pour démontrer l'impact de certains paramètres sur les performances du système, en utilisant le langage de programmation Matlab. Le travail se conclut par une conclusion.

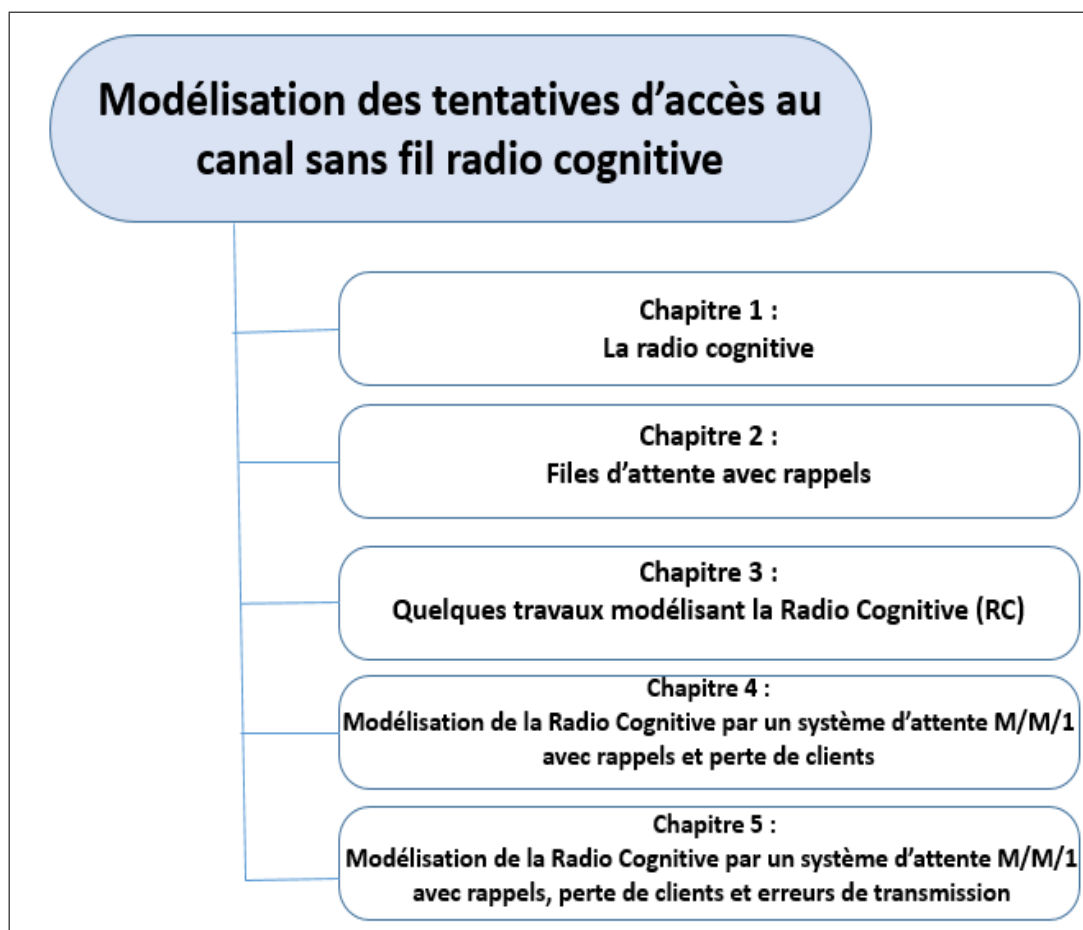


FIGURE 1 – Organisation du mémoire.

Chapitre 1

La radio cognitive

Introduction

Ce chapitre plonge au cœur de la radio cognitive en mettant l'accent sur les Utilisateurs Primaires (PU_s) et les Utilisateurs Secondaires (SU_s). Nous explorerons les principes fondamentaux de cette technologie révolutionnaire, son architecture et les multiples domaines d'application qui en découlent. La radio cognitive ouvre la voie à une utilisation plus efficace du spectre radioélectrique, offrant des opportunités uniques pour une communication sans fil intelligente et adaptative.

1.1 Historique

L'idée de la radio cognitive remonte à la fin des années 1990, lorsque Joseph Mitola III a présenté officiellement le concept lors d'un séminaire à l'Institut royal de technologie (KTH) en 1998. Cette idée a ensuite été publiée dans un article de J. Mitola et G. Maguire en 1999 [19]. J. Mitola III est souvent considéré comme le "Père de la radio logicielle" en raison de ses contributions majeures à ce domaine. Il a combiné son expertise en radio logicielle avec son intérêt pour l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle pour développer la technologie de la radio cognitive. Selon Mitola, une radio cognitive est capable de connaître, percevoir et apprendre de son environnement, puis agir pour simplifier la vie de l'utilisateur.

1.2 Définition

La Radio Cognitive (RC) est une forme de communication sans fil avancée qui repose sur la capacité d'un émetteur/récepteur à détecter intelligemment les canaux de communication utilisés et disponibles, ainsi qu'à s'adapter dynamiquement pour optimiser l'utilisation du spectre radioélectrique tout en réduisant les interférences avec d'autres utilisateurs [10].

Un réseau cognitif coordonne ces transmissions en exploitant les différentes parties du spectre disponibles à un moment et un endroit donnés, nécessitant une station de base capable de travailler sur un large éventail de fréquences pour reconnaître et gérer efficacement les divers signaux du médium de communication.

1.3 Architecture

L'architecture de la radio cognitive se fonde sur une coordination dynamique entre les utilisateurs primaires (PU_s) et les utilisateurs secondaires (SU_s), permettant à ces derniers d'accéder de manière opportuniste et efficace aux bandes de fréquences non utilisées par les PU_s . Selon la représentation de l'architecture de la radio cognitive dans la Figure 1.4,

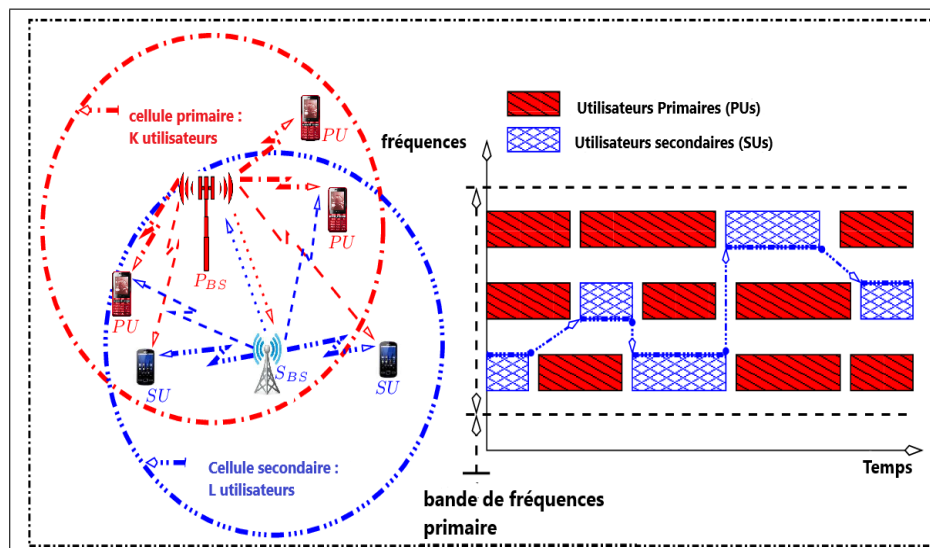


FIGURE 1.1 – Architecture de la radio cognitive

les utilisateurs primaires (PU_s) sont positionnés au centre, entourés par les utilisateurs secondaires (SU_s). Cette disposition symbolise la coordination dynamique entre ces deux groupes dans l'exploitation des opportunités de spectre non utilisé.

1.3.1 Les Utilisateurs Primaires (PU_s)

Les utilisateurs primaires (PU_s) sont des entités autorisées à utiliser une partie définie du spectre radioélectrique en vertu d'une licence officielle.

1.3.2 Les Utilisateurs Secondaires (SU_s)

Les utilisateurs secondaires (SU_s) sont des dispositifs capables de détecter les portions du spectre radioélectrique non utilisées par les PU_s et de les exploiter de manière opportuniste.

1.4 Composants de la radio cognitive

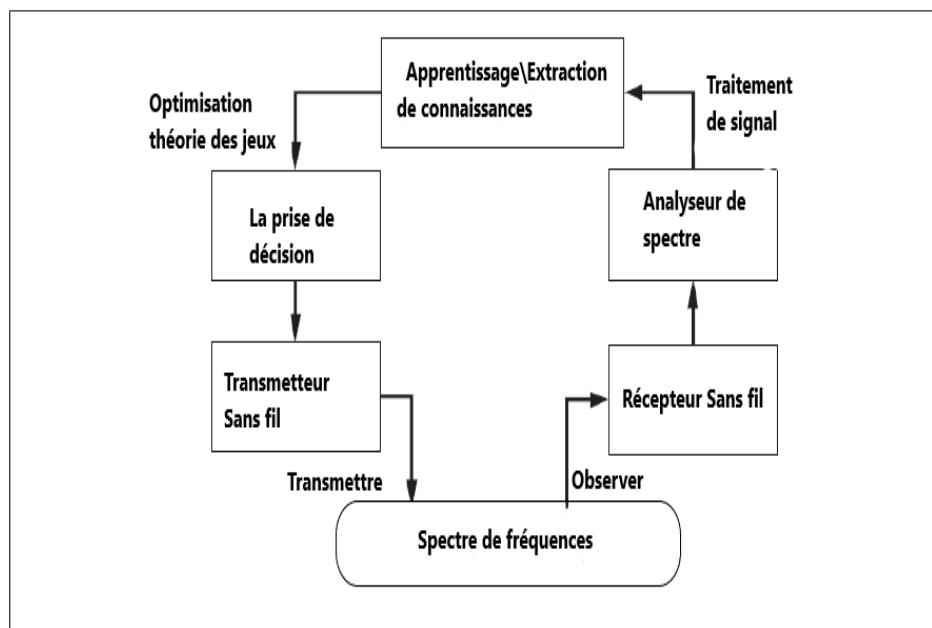


FIGURE 1.2 – Composants de la radio cognitive

- **Émetteur/Récepteur :**

Le principal composant d'un système sans fil est l'émetteur/récepteur, chargé à la fois de transmettre des données et de recevoir des signaux. De plus, le récepteur sans fil est utilisé pour surveiller l'activité sur le spectre de fréquence (détection de spectre). Les paramètres de l'émetteur/récepteur dans les nœuds de la radio cognitive peuvent être ajustés de manière dynamique.

- **Analyseur de spectre (Spectrum analyser) :**

L'analyseur de spectre utilise les signaux mesurés pour évaluer l'occupation du spectre, notamment pour détecter la présence de signaux provenant d'utilisateurs primaires et pour identifier les fréquences disponibles pour les utilisateurs secondaires. Il est essentiel que l'analyseur de spectre garantisse l'intégrité des transmissions des utilisateurs primaires lorsqu'un utilisateur secondaire souhaite accéder au spectre. Dans cette optique, différentes techniques de traitement du signal sont employées pour surveiller l'utilisation du spectre.

- **Extraction de connaissances et apprentissage (Knowledge extraction/learning) :**

L'extraction de connaissances et l'apprentissage dans le domaine des communications sans fil exploitent les données sur l'utilisation du spectre afin de mieux appréhender l'environnement radiofréquence (*RF*), notamment le comportement des utilisateurs disposant de licences. Cela implique la création et la mise à jour d'une base de connaissances sur l'accès au spectre, utilisée ensuite pour ajuster les paramètres de transmission en fonction des objectifs visés et des contraintes rencontrées. Des techniques d'apprentissage sont souvent employées pour ces tâches d'extraction et de mise en pratique des connaissances acquises.

- **Prise de décision (Decision making) :**

Une fois la connaissance de l'utilisation du spectre acquise, il est nécessaire de prendre des décisions concernant l'accès au spectre. Ces décisions optimales sont influencées par l'environnement ambiant et par le comportement coopératif ou compétitif des utilisateurs secondaires. Diverses techniques peuvent être employées pour atteindre une solution optimale. Par exemple, la théorie de l'optimisation est applicable lorsque le système peut être modélisé comme une entité unique avec un seul objectif. En revanche, les modèles de la théorie des jeux sont pertinents lorsque le système est composé de plusieurs entités, chacune poursuivant ses propres objectifs. L'optimisation stochastique peut être utilisée lorsque les états du système sont aléatoires.

1.5 Domaines d'application de la radio cognitive

Le concept de la radio cognitive peut être appliqué à une variété de scénarios de communication sans fil, nous allons en décrire quelques-uns :

- **Coexistence de différentes technologies sans fil**

La radio cognitive permet une gestion intelligente du spectre, facilitant la coexistence

harmonieuse de diverses technologies sans fil telles que le Wi-Fi, le Bluetooth, les réseaux cellulaires, et autres systèmes de communication. Cela se traduit par une utilisation plus efficace du spectre disponible, réduisant les interférences et améliorant la qualité de service pour tous les utilisateurs.

- **Services de cyber santé (eHealth services)**

Dans le domaine de la santé, la radio cognitive peut être utilisée pour assurer une communication fiable et continue entre divers dispositifs médicaux. Cela est particulièrement crucial pour les applications de télémédecine, les systèmes de surveillance à distance des patients, et les infrastructures de santé intelligentes, où une connectivité stable et sécurisée est essentielle.

- **Réseaux d'urgence**

Les systèmes de radio cognitive peuvent être déployés pour améliorer les communications dans les situations d'urgence. En permettant une utilisation dynamique et adaptative du spectre, ces systèmes assurent que les services de secours, comme les pompiers, la police, et les équipes médicales, disposent toujours d'une connexion fiable, même dans des environnements encombrés ou lorsque les infrastructures traditionnelles sont endommagées.

- **Réseaux militaires**

Dans le contexte militaire, la radio cognitive joue un rôle crucial en assurant des communications sécurisées et résistantes aux interférences. Les systèmes de radio cognitive peuvent s'adapter rapidement aux conditions changeantes du champ de bataille, en trouvant et en utilisant des fréquences disponibles tout en évitant les canaux utilisés par les ennemis ou d'autres forces alliées. Cela garantit une communication efficace et sécurisée, essentielle pour les opérations militaires modernes.

1.6 Position du Problème

Le système d'accès au canal radio cognitif est un domaine crucial pour optimiser l'utilisation du spectre et garantir une qualité de service efficace pour les utilisateurs secondaires (SU). Notre recherche se concentre spécifiquement sur le service de transmission des paquets (SU) et l'impact du taux d'arrivée des paquets primaires (PU) sur cette qualité de service.

Dans notre modèle, les clients sont représentés par les paquets provenant des stations secondaires, tandis que le service fait référence à la transmission de ces paquets sur le canal sans fil. Nous considérons un scénario où l'arrivée d'un paquet primaire entraîne la perte de

tous les paquets secondaires en cours de transmission, mettant ainsi fin à la transmission des paquets secondaires.

Notre objectif principal est d'évaluer et de quantifier l'impact de cette politique d'accès au canal sur la qualité de service des utilisateurs secondaires. Nous cherchons à comprendre comment le taux d'arrivée des paquets primaires influence la probabilité de perte de paquets pour les utilisateurs secondaires, ainsi que la stabilité globale du système de transmission.

Pour cela, nous envisageons d'utiliser des modèles analytiques et des applications numériques pour explorer différents scénarios de taux d'arrivée des paquets primaires et évaluer leurs conséquences sur la qualité de service des utilisateurs secondaires. En identifiant les paramètres critiques et les seuils de performance, notre recherche vise à proposer des recommandations pour améliorer la gestion du canal radio cognitif et optimiser la satisfaction des utilisateurs secondaires.

Conclusion

La radio cognitive représente une étape majeure dans l'évolution des communications sans fil, offrant des solutions innovantes pour relever les défis de la connectivité moderne. Son impact continuera de se faire sentir dans de nombreux secteurs, propulsant notre société vers un avenir plus connecté, flexible et intelligent.

Chapitre 2

Files d'attente avec rappels

Introduction

La théorie des files d'attente est cruciale pour analyser et modéliser les systèmes logistiques, les systèmes informatiques, les réseaux de transmission de données, etc.... Elle vise à étudier les systèmes où des clients cherchent à accéder à des ressources pour obtenir un ou des service(s). Lorsque plusieurs clients demandent la même ressource au même temps, cela crée des retards dans la prestation des services et forme des files d'attente [3]. L'analyse théorique de ces systèmes permet de prédire leurs performances, d'identifier les composants essentiels et de comprendre les impacts d'un changement dans les conditions de fonctionnement. Les files d'attente sont un sujet de recherche très étudié, avec une abondante littérature à leur sujet. Dans ce chapitre, nous rappelons certaines notions sur les systèmes d'attente classiques et particulièrement sur les files d'attente avec rappels [1].

2.1 Files d'attente classiques

2.1.1 Description d'un système de files d'attente classique

Une file d'attente représente un système où des clients, symbolisant diverses activités nécessitant l'accès à des ressources, arrivent de manière aléatoire vers une station, qui incarne ces ressources, afin de recevoir un service. Ces clients peuvent prendre diverses formes, tels que des paquets de données, des appels téléphoniques, des machines, etc, tout comme la station de service peut être un canal de transmission, un centre téléphonique, un processeur, etc. La station de service peut être dotée d'un ou de plusieurs serveurs, et lorsque tous ces serveurs sont occupés, les clients doivent attendre dans une file d'attente,

si elle existe, jusqu'à ce qu'un serveur devienne à nouveau disponible [21].

2.2 Caractéristiques de base d'un système d'attente

Les éléments ou paramètres principaux utilisés pour décrire un système de files d'attente classique [21] sont les suivants :

- Le processus d'arrivée des clients au système ;
- Le processus de service ;
- Le nombre de serveurs ;
- La capacité du système ;
- La discipline de service.

Ces différents paramètres sont définis ci-après.

2.2.1 Le processus d'arrivée des clients au système

Le processus d'arrivée des clients dans le système comprend deux aspects principaux : le temps entre les arrivées successives, défini comme le temps d'inter-arrivées, et la nature des arrivées, qu'elles soient individuelles ou par groupes. Pour les arrivées groupées, la taille du nombre de clients par groupe est également déterminée, pouvant être fixe ou aléatoire. Les clients peuvent provenir d'une source finie ou infinie.

2.2.2 Le processus de service

Le processus de service décrit comment les clients sont pris en charge, en précisant la durée moyenne nécessaire pour chaque service, qui peut être soit déterministe soit aléatoire. En cas de distribution aléatoire, la répartition du temps de service est définie. Le service peut être individuel, où un seul client est traité à la fois par un serveur, ou par groupes, où plusieurs clients sont servis simultanément.

2.2.3 Le nombre de serveurs

Le système peut être équipé d'un ou plusieurs serveurs opérant en parallèle pour répondre aux demandes des clients. Un client ayant accès à plusieurs serveurs libres peut choisir aléatoirement le serveur auquel il demande le service. Si tous les serveurs sont occupés lorsqu'un client arrive, il rejoint une file d'attente commune à tous les serveurs. Dans certains cas, il peut y avoir une file d'attente distincte pour chaque serveur.

2.2.4 La capacité de la file du système

Le système peut être doté d'un espace d'attente à capacité infinie pour accueillir les clients, ou d'un espace d'attente limité où le nombre maximal de clients pouvant être pris en charge simultanément est spécifié. Dans les systèmes d'attente à capacité limitée, les clients qui arrivent lorsque l'espace est plein seront perdus, ce qui caractérise ce type de système comme un système avec pertes.

2.2.5 La discipline de service

La discipline de service détermine comment les clients sont ordonnancés pour recevoir le service. Plusieurs disciplines existent cependant la discipline la plus utilisée est celle du *PAPS* "Premier Arrivé, Premier Servi" (First Come First Served (*FCFS*)).

2.3 Notation de Kendall

La classification des systèmes de files d'attente utilise une notation symbolique introduite par [12], comprenant six symboles disposés dans l'ordre suivant :

$$A/B/s/N/K/D_s, \text{ où :}$$

- A : Distribution des temps d'inter-arrivées ;
- B : Distribution des durées de service ;
- s : Nombre de serveurs en parallèle ;
- N : Capacité du système, comprenant l'espace d'attente et le nombre de serveurs ;
- K : Taille de la population source ;
- D_s : Discipline de service.

Voici une liste présentant quelques lois de probabilité couramment utilisées dans la modélisation des systèmes de files d'attente, avec leurs symboles correspondants pour les spécifications A et B :

- M : Distribution Markovienne, impliquant un processus de Poisson pour les arrivées et une loi exponentielle pour le temps de service.
- E_k : Distribution d'Erlang d'ordre k .
- D : Distribution déterministe.
- H_k : Distribution hyper-exponentielle d'ordre k .
- G : Distribution générale.

- G_I : Distribution générale indépendante.

Les principales disciplines de service sont les suivantes :

- *FCFS* (First Come First Served) : premier arrivé, premier servi ;
- *FIFO* (First In First Out) : premier arrivé, premier sorti ;
- *LIFO* (Last In First Out) : dernier arrivé, premier servi ;
- *SIRO* : service dans un ordre aléatoire ;
- *PS* (Processor Sharing) : partage de processeur.

2.4 Objet de la théorie des files d'attente

Étant donné une file d'attente, la théorie des files d'attente se propose de produire un certain nombre de résultats, tels :

- la longueur moyenne de la file,
- la durée moyenne de service,
- le taux moyen d'inactivité des serveurs,
- le temps moyen d'attente dans une file,
- le temps moyen total de service dans le système (ou « temps de résidence » en informatique).

Elle peut étudier l'existence ou non d'un régime stationnaire, le risque de saturation du service, la discipline optimale par rapport au temps de résidence, etc.

2.5 Formule de Little

La formule de Little [18] établit une relation entre le temps moyen qu'un client passe dans le système (ou en attente) et le nombre moyen de clients dans le système (ou en attente) formulée par :

$$W_s = \lambda \times L_s, \quad (2.1)$$

où : λ est le taux d'arrivée effectif des clients, L_s est le temps moyen de séjours dans le système et W_s le nombre moyen de clients en service. De manière similaire, si W_q représente le nombre moyen de clients dans la file d'attente et L_q le temps moyen d'attente d'un client, alors la formule de Little pour la file d'attente est :

$$W_q = \lambda \times L_q. \quad (2.2)$$

2.6 Chaînes de Markov

Les chaînes de Markov sont un outil fondamental pour modéliser les processus en théorie des files d'attente et ce est dû principalement à leur propriété d'absence de mémoire, ce qui simplifie considérablement leur analyse.

2.7 Systèmes de files d'attente markoviens

Les systèmes de files d'attente markoviens sont caractérisés par les temps d'inter-arrivées et les durées de service qui suivent des lois exponentielles indépendantes. La propriété d'absence de mémoire de la loi exponentielle simplifie l'analyse de ces systèmes. Cette analyse mathématique repose sur l'introduction d'un processus stochastique approprié, souvent le processus $X(t), t \geq 0$ défini comme le nombre de clients dans le système à un instant donné t . L'évolution temporelle de ce processus markovien $X(t), t \geq 0$ est entièrement caractérisé par l'absence de mémoire.

2.8 Systèmes de files d'attente non markoviens

Lorsque l'on abandonne l'hypothèse d'exponentialité pour l'un des deux aspects stochastiques essentiels, à savoir le temps des inter-arrivées ou la durée de service, ou encore lorsque l'on introduit des paramètres supplémentaires pour prendre en compte des spécificités particulières tels que la priorité, les rappels, ..., ce qui donne des modèles non markoviens. Étudier de tels modèles peut être difficile, voire impossible, ce qui incite à recourir à des processus markoviens pour simplifier l'analyse.

Parmi les méthodes les plus utilisées pour décrire le comportement d'un système non markovien par un processus de Markov, on trouve :

- La méthode de la chaîne de Markov induite : Cette approche, développée par Kendall, implique le choix d'une séquence d'instant $1, 2, 3, \dots, n$ (déterministes ou aléatoires) de manière à ce que la chaîne induite $X_n, n \geq 0$, où $X_n = X(n)$, soit markovienne et homogène [12].
- La méthode des variables auxiliaires : Elle consiste à enrichir l'information sur le processus $X(t), t \geq 0$ de manière à le rendre markovien, en se concentrant sur le processus $X(t), A(t_1), A(t_2), \dots, A(t_n)$, où les variables $A(t_k), k \in \{1, 2, \dots, n\}$, sont appelées auxiliaires.
- La méthode des événements fictifs : Cette approche consiste à introduire des

événements fictifs pour donner une interprétation probabiliste aux transformées de Laplace et aux variables aléatoires décrivant le système étudié.

D'autres méthodes d'analyse des systèmes non markoviens existent, telles que l'approche par les martingales et les méthodes d'approximation.

2.9 Systèmes de files d'attente avec rappels

Les systèmes de files d'attente avec rappels apparaissent dans beaucoup de domaines, tels que les réseaux téléphoniques, les réseaux informatiques et la télécommunication. Ces systèmes sont caractérisés par le fait que les clients qui trouvent tous les serveurs occupés ou non disponibles, rappellent ultérieurement pour le service, à des intervalles de temps aléatoires. Cependant, la prise en considération du phénomène d'appels répétés a rendu les résultats de la théorie des files d'attente standards inadéquats, et a introduit de grandes difficultés analytiques. Avant l'introduction de ces modèles, les systèmes téléphoniques étaient souvent modélisés avec des modèles à pertes qui ne prenaient pas en compte cette répétition d'appels importante. Les modèles de files d'attente avec rappels se sont avérés très utiles pour modéliser d'autres systèmes comme les opérations d'atterrissage sur une piste d'aéroport par exemple. Dans ces modèles, un client qui arrive et trouve le serveur occupé entre dans une file d'attente spéciale (dite orbite) où il réessayera de rappeler ultérieurement selon une politique de rappels définie. Si le serveur est libre à l'arrivée du client, celui-ci est servi immédiatement et quitte le système.

Les systèmes d'attente avec rappels sont largement utilisés dans l'étude des systèmes de communication en particulier la modélisation de (RC) à travers l'utilisation de modèles d'attente et d'autres formalismes mathématiques (voir [14, 15] et les références qu'ils contiennent).

2.9.1 Description d'un système de file d'attente avec rappels

Pour caractériser les systèmes avec rappels, on utilise la notation de Yang et Templeton " $A/S/N/m/O/H$ " inspirée de la notation de Kendall, où : O est la capacité de l'orbite (peut être omise si elle est infinie) [16]. La séquence $H = H_i, i \geq 0$ est la fonction de persévérance, avec H_i est la probabilité qu'un client fasse une $(i + 1)^{ième}$ tentative de rappel, après une $i^{ième}$ tentative échouée. Si tous les clients sont persévérants, $H_i = 1$ pour tout i , le symbole H pourra être supprimé dans ce cas.

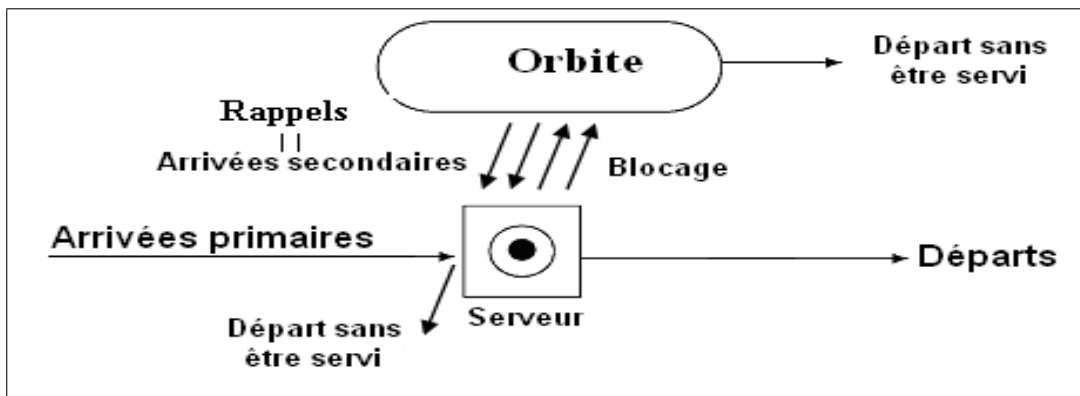


FIGURE 2.1 – Schéma général d'un système de files d'attente avec rappels.

2.9.2 Politiques de rappels

Dans le contexte des files d'attente avec rappels, il est crucial de définir la politique de rappels, qui est à déterminer de telle sorte à ce que le modèle proposé soit aussi représentatif du système réel à modéliser. Les différentes politiques de rappels sont données par Artalejo dans [2], où il décrit ces différentes politiques de rappels existantes (politique de rappels classiques, politique de rappels constants et politique de rappels linéaires).

2.9.3 Les principales mesures de performance du modèle M/M/1 avec rappels classiques

On considère un système de files d'attente à un seul serveur dont lequel les clients primaires arrivent suivant un processus de poisson de taux λ , si le client arrive et trouve le serveur inoccupé il l'occupe immédiatement, et après l'achèvement de son service il quitte le système. Autrement si le serveur est occupé, il rejoint l'orbite et rappelle ultérieurement jusqu'à ce qu'il trouve le serveur disponible. Les temps de service sont exponentiellement distribués de paramètre μ . On suppose que les temps entre les inters-arrivées des clients primaires, les temps des inter-rappels et les temps de service sont mutuellement indépendants. On note par $C(t)$ l'état de serveur à l'instant t . Les événements $C(t) = 0$ ou $C(t) = 1$ correspondent respectivement à l'état de serveur (libre ou occupé), et on note par $N(t)$ le nombre de clients dans l'orbite à l'instant t . Supposons que le régime stationnaire existe ($\rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1$) [?], Il est clair que le processus :

$$\{(C(t), N(t)), t > 0\}$$

est markovien bi-dimensionnel, à espace d'état $\{0, 1\} \times N$.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les concepts fondamentaux des files d'attente classiques. On s'est intéressé en particulier aux systèmes de files d'attente avec rappels et plus précisément au système $M/M/1$ avec rappels vu qu'il fera l'objet de la composition du modèle à proposer pour étude par la suite dans les chapitres avenir. Ensuite, nous avons abordé le principe d'analyse de ces systèmes à savoir définition de la chaîne de Markov décrivant le comportement de ces systèmes puis sa distribution stationnaire pour calculer par la suite leurs caractéristiques.

Chapitre 3

Quelques travaux modélisant la Radio Cognitive (*RC*)

Introduction

La radio cognitive représente une avancée significative dans les communications sans fil, offrant une flexibilité accrue et une meilleure utilisation des ressources spectrales. Dans ce chapitre nous allons présenter un panorama synthétique et organisé des travaux déjà réalisés sur la modélisation et l'analyse de la *RC*, et plus particulièrement les travaux ayant utilisé les outils de modélisation mathématiques (chaîne de Markov, files d'attente et Réseaux de Petri ...).

3.1 Radio Cognitive : Rendre les Radios Logicielles Plus Personnalisées

Cet article fondamental de Mitola et Maguire [19] introduit le concept de la radio cognitive, une avancée significative par rapport aux radios définies par logiciel (*SDR*). Les radios cognitives sont caractérisées par leur capacité à percevoir et à analyser leur environnement radioélectrique, permettant une gestion dynamique et efficace du spectre. Elles sont capables de prendre des décisions en temps réel, basées sur des observations contextuelles et des apprentissages antérieurs, pour ajuster leurs paramètres de transmission (fréquence, puissance, schéma de modulation) et optimiser les performances. Les auteurs soulignent plusieurs applications potentielles des radios cognitives, notamment la gestion dynamique du spectre pour une utilisation plus efficace des fréquences disponibles, l'amélioration

de la qualité de service en minimisant les interférences, et l'augmentation de la fiabilité et de la sécurité des communications sans fil. En personnalisant les services en fonction des préférences et du contexte de chaque utilisateur, les radios cognitives promettent de transformer les systèmes de communication sans fil, les rendant plus intelligents, adaptatifs, et répondant aux besoins spécifiques des utilisateurs. Ce travail pionnier a établi les bases pour de nombreuses recherches ultérieures, en posant les principes fondamentaux et en identifiant les défis à relever pour la réalisation des radios cognitives. L'impact de cet article se fait sentir dans le développement continu des technologies de communication sans fil, visant à rendre les réseaux plus flexibles et efficaces.

3.2 Radio Cognitive pour des Communications Multimédia Mobiles Flexibles

Dans cet article, Joseph Mitola [?] explore l'application des radios cognitives aux communications multimédia mobiles, soulignant leur capacité à optimiser l'utilisation du spectre et à améliorer la qualité des services pour les utilisateurs mobiles. Les radios cognitives détectent les fréquences disponibles et ajustent dynamiquement leurs paramètres de transmission en fonction des conditions du réseau, tout en intégrant des techniques d'intelligence artificielle pour apprendre et prendre des décisions optimisées. Elles offrent des services personnalisés basés sur les préférences des utilisateurs, améliorant ainsi leur expérience. Les applications potentielles incluent l'optimisation de la diffusion de contenus multimédia, le fonctionnement transparent à travers différents réseaux (*Wi-Fi*, *LTE*), et la facilitation des communications de machine à machine dans l'Internet des Objets (*IoT*). Cet article met en avant le potentiel des radios cognitives pour transformer les réseaux de communication sans fil, les rendant plus intelligents et efficaces.

3.3 Radio Cognitive : Communications Sans Fil Renforcées par l'Intelligence

L'article de Haykin [10] présente une exploration approfondie des radios cognitives dans le contexte des communications sans fil. L'essence du travail réside dans la conception de radios cognitives comme des systèmes "intelligents" capables de percevoir, de raisonner et d'apprendre de leur environnement radioélectrique, ce qui les rend adaptatives et efficaces. Haykin met en évidence les principes fondamentaux de la théorie de l'information, de la

théorie des jeux et de la théorie des communications utilisés pour modéliser et évaluer les performances des radios cognitives.

Le travail aborde également les défis techniques et réglementaires liés à l'implémentation des radios cognitives, notamment la gestion dynamique du spectre, l'allocation optimale des ressources, et l'interférence avec les systèmes existants. L'article souligne le potentiel des radios cognitives pour répondre aux demandes croissantes en bande passante et en efficacité des réseaux sans fil, tout en contribuant à une utilisation plus intelligente et efficace du spectre radioélectrique. En résumé, l'article de Haykin constitue une contribution significative à la compréhension et au développement des radios cognitives pour les communications sans fil modernes.

3.4 Communications sans fil

L'auteur Goldsmith [9] explore dans son livre "Wireless Communications" la modélisation des réseaux de radio cognitive. Une méthodologie clé qu'il utilise est l'approche de la théorie des jeux pour analyser les interactions entre les utilisateurs primaires et secondaires dans un environnement de spectre dynamique. Cette approche permet de modéliser les décisions de partage du spectre et d'évaluer les stratégies optimales pour maximiser l'efficacité du spectre.

En appliquant cette méthodologie, Goldsmith identifie des résultats significatifs. Il met en évidence l'importance de l'adaptabilité des systèmes de radio cognitive pour répondre aux variations dynamiques du spectre. De plus, il souligne l'efficacité des mécanismes de négociation et de coopération entre les utilisateurs pour améliorer la gestion du spectre. Ses conclusions mettent en lumière le potentiel des approches de modélisation avancées pour concevoir des réseaux de radio cognitive plus efficaces et robustes.

3.5 La technologie de la radio cognitive

L'article "Cognitive Radio Technology" de Li, G. Y., et Kim, K. J [6], examine la modélisation des réseaux de radio cognitive. La méthode de modélisation utilisée repose sur une approche analytique combinée à des simulations numériques. Les auteurs décrivent en détail les caractéristiques des modèles mathématiques utilisés pour représenter le comportement dynamique des réseaux de radio cognitive, notamment en ce qui concerne la gestion des ressources spectrales et la prise de décision intelligente des radios cognitives. Ils mettent en œuvre des algorithmes de gestion de spectre basés sur des critères tels que

la disponibilité des canaux, les besoins des utilisateurs primaires et secondaires, ainsi que les contraintes de qualité de service. L'application de ces modèles est illustrée à travers des cas d'étude où les performances des réseaux de radio cognitive sont évaluées sous différentes conditions de charge et de disponibilité de spectre. Les résultats mettent en évidence l'efficacité des techniques de modélisation proposées pour améliorer la gestion du spectre et optimiser les performances globales des réseaux de radio cognitive. Les conclusions importantes soulignent l'importance de l'approche analytique dans la conception et l'optimisation des réseaux de radio cognitive, ainsi que les défis persistants liés à la prise de décision intelligente dans des environnements dynamiques et hétérogènes en termes de spectre et d'utilisateurs.

3.6 Réseaux de Radio Cognitive

Le livre de Chen et Park [20] offre une vue d'ensemble complète des réseaux de radio cognitive, couvrant à la fois les théories fondamentales et les applications pratiques. Chen et Park ont discuté des architectures de réseaux cognitifs, des protocoles de communication et des algorithmes d'apprentissage automatique utilisés pour la gestion dynamique du spectre. Ils ont abordé également les questions de sécurité et les défis de mise en œuvre. Ce livre inclut des études de cas et des exemples pratiques pour illustrer les concepts clés de la *RC*. En plus des aspects techniques, les auteurs Chen et Park ont examiné les implications économiques et les politiques réglementaires nécessaires pour soutenir l'adoption des radios cognitives.

3.7 Modélisation et Analyse des Performances des Réseaux de Radio Cognitive en Utilisant RdPSC Chronométrés

Les auteurs [7] ont utilisé des réseaux de Petri colorés chronométrés stochastiques (Stochastic Timed Colored Petri Nets) pour modéliser et analyser les performances des réseaux de radio cognitive. Cette approche combine la capacité des réseaux de Petri colorés à représenter des systèmes complexes avec la dimension temporelle des réseaux chronométrés et la prise en compte de l'incertitude avec les réseaux stochastiques. La modélisation avec des réseaux de Petri colorés permet de représenter de manière graphique les différents états du système, les transitions entre ces états, ainsi que les événements déclencheurs

et les conditions associées à ces transitions. L'aspect chronométré ajoute une dimension temporelle aux modèles, ce qui est crucial pour comprendre les performances des réseaux de radio cognitive où le temps de réaction et la gestion dynamique des ressources sont essentiels.

Les résultats obtenus grâce à cette approche ont permis de mieux comprendre le comportement dynamique des réseaux de radio cognitive, en particulier en ce qui concerne la gestion du spectre et l'optimisation des performances. Les conclusions importantes ont souligné l'efficacité de l'utilisation des réseaux de Petri colorés chronométrés stochastiques pour modéliser des systèmes aussi complexes que les réseaux de radio cognitive, en offrant une représentation visuelle claire des interactions et des flux de données. Cela a également ouvert des perspectives pour l'amélioration des algorithmes de gestion du spectre et des stratégies de contrôle dans ces réseaux, contribuant ainsi à l'avancement des technologies de communication sans fil cognitives.

3.8 Modélisation, analyse et évaluation des méthodes d'accès au médium dans les réseaux sans fil

Dans cet article, Lamia Lakaouar [13] propose une méthode de modélisation basée sur des modèles de files d'attente pour évaluer les méthodes d'accès au médium dans les réseaux de radio cognitive. La modélisation repose sur des files d'attentes $M/M/1$ avec rappels, prenant en compte les caractéristiques dynamiques des canaux disponibles pour les utilisateurs primaires et secondaires. L'approche intègre des mécanismes de rétroaction pour ajuster les paramètres de l'accès au médium en fonction de la disponibilité du spectre.

L'application de cette méthode aux réseaux de radio cognitive met en évidence des résultats significatifs. La modélisation permet de quantifier l'efficacité des méthodes d'accès au médium en termes de débit, de latence et de qualité de service pour les utilisateurs secondaires. Les simulations montrent que l'utilisation de rappels améliore la capacité du réseau à exploiter efficacement le spectre disponible, réduisant les collisions et optimisant l'utilisation des ressources.

Les conclusions de cette étude soulignent l'importance de la modélisation dans la conception et l'évaluation des protocoles d'accès au médium dans les réseaux de radio cognitive. La méthode présentée offre une approche analytique robuste pour évaluer les performances des algorithmes d'accès au médium et contribue à l'amélioration globale de l'efficacité spectrale et de la qualité de service dans ces réseaux complexes et dynamiques.

3.9 Une file d'attente de réessai sur un seul serveur peu fiable avec des collisions et des erreurs de transmission

L'article de L. Lakaour [15] présente une méthode de modélisation pour une file d'attente de réessai à serveur unique avec des collisions et des erreurs de transmission dans le contexte des réseaux de radio cognitive. La méthode de modélisation prend en compte l'aspect de fiabilité réduite du serveur, ce qui est crucial dans les environnements où les collisions et les erreurs de transmission sont fréquentes. En utilisant des techniques de théorie des files d'attente avancées, l'article parvient à capturer les effets de ces phénomènes sur les performances du réseau.

Les résultats de l'étude mettent en lumière l'impact significatif des collisions et des erreurs de transmission sur les temps d'attente, les taux de réussite de transmission et les ressources utilisées dans les réseaux de radio cognitive. En particulier, l'article souligne comment ces phénomènes peuvent entraîner des retards supplémentaires et des réessais fréquents, affectant ainsi la qualité de service pour les utilisateurs du réseau.

Les conclusions importantes de l'article soulignent la nécessité de prendre en compte la fiabilité réduite du serveur, les collisions et les erreurs de transmission lors de la conception et de l'optimisation des protocoles de communication dans les réseaux de radio cognitive. Ces résultats fournissent des informations précieuses pour améliorer la robustesse et l'efficacité des communications dans ces environnements dynamiques et complexes.

3.10 Allocation dynamique des bandes spectrales dans les réseaux sans-fil à radio cognitive

L'article [4] présente une méthode de modélisation pour l'allocation dynamique des bandes spectrales dans les réseaux sans-fil via la radio cognitive. Cette méthode repose sur une approche basée sur les files d'attente et les processus stochastiques pour analyser et optimiser l'utilisation du spectre disponible. L'auteur de [4] a évalué la performance du système en termes de délai d'attente, de taux de rejet et d'efficacité spectrale. Les résultats obtenus démontrent l'efficacité de l'allocation dynamique des bandes spectrales dans les réseaux de radio cognitive, en permettant une meilleure utilisation du spectre disponible et en améliorant les performances globales du système.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un panorama synthétique des travaux sur la modélisation de la radio cognitive (*RC*). Ce panorama montre l'importance de la modélisation pour optimiser les performances des réseaux *RC*. Ainsi, dans le chapitre suivant, nous allons proposer une modélisation de la radio cognitive par un système d'attente $M/M/1$ avec rappels et perte de clients.

Chapitre 4

Modélisation de la Radio Cognitive par un système d'attente $M/M/1$ avec rappels et perte de clients

Introduction

L'analyse approfondie des files d'attente avec rappels comprend l'étude de politiques de rappels spécifiques à chaque application. Ces politiques, essentielles pour optimiser les performances des systèmes, sont conçues en tenant compte des besoins et des contraintes propres à chaque contexte d'utilisation. Cette approche permet d'évaluer l'efficacité de chaque politique dans des scénarios réalistes, offrant ainsi des recommandations pratiques pour la mise en œuvre de systèmes de files d'attente avec rappels dans divers environnements.

4.1 Modélisation

Considérons le système d'accès au canal radio cognitif. Nous nous intéressons au service (transmission) des paquets SU , et l'impact du taux d'arrivée des paquets PU sur la qualité du service. Dans notre travail, les clients sont les paquets des stations secondaires, le service est la transmission de ces paquets sur le canal son fil. L'arrivée d'un paquet primaire, engendre la perte de tous les paquets secondaires et la fin de la transmission des paquets primaires. Ceci correspond à la transmission du système pour les transmissions des stations secondaires. Dans la section (4.2), nous présentons une description détaillée du modèle mathématique.

4.2 Description du modèle

Nous considérons le système d'attente $M/M/1$ avec rappels, Les paquets secondaire arrivent de l'extérieur du système selon un processus de Poisson de taux λ . À l'arrivée du paquet secondaire, si le médium est libre, ce paquet accède au médium avec une probabilité p ou rejoint l'orbite avec une probabilité $(1 - p)$. Le service est exponentiel de paramètre μ . les paquet primaire arrivent selon un processus de Poisson de taux ε . Si un paquet primaire arrive, il accède directement au serveur, entraînant la perte de tous les paquets secondaire en orbit. Le service des paquets primaires se fait selon une loi exponentielle de taux σ .

Nous supposons que les temps de service des clients sont indépendants, suivent une distribution exponentielle de moyenne $1/\mu$ et les processus stochastiques impliqués dans le système sont mutuellement indépendants. Ce model est décrit par la chaine bi-dimensionnelle. $C(t), X(t)$, où

$$C(t) = \begin{cases} 0 & \text{Si le médium est libre à l'instant } t ; \\ 1 & \text{Si le médium est occupé par le serveur d'un paquet } SU \text{ à l'instant } t \\ & \text{par les } (SUs); \\ 2 & \text{Si le médium est occupé par le serveur d'un paquet } SU \text{ à l'instant } t \\ & \text{par les } (PUs). \end{cases}$$

$X(t) = j$, j est le nombre des clients en orbite.

Le processus $C(t), X(t); t = 0$ est une chaîne de Markov à temps continu, irréductible, apériodique et homogène dans le temps avec l'espace d'état

$$S = (0, j), (1, j), (2, 0) / j = 0, 1, \dots$$

4.3 Calcul de la distribution stationnaire

Soit $P_j = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{C(t) = 0, X(t) = j\}$, $Q_j = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{C(t) = 1, X(t) = j\}$ et $R_j = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{C(t) = 2, X(t) = 0\}$, $j \geq 0$, Elles représentent les distributions conjointes de l'état du serveur et de la longueur de la file en orbite à l'état stationnaire.

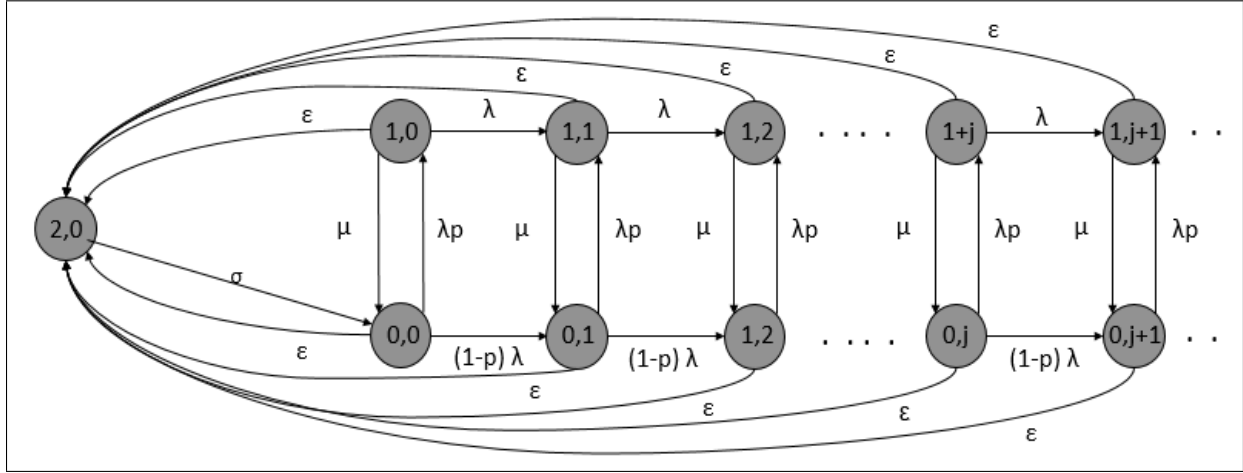


FIGURE 4.1 – Diagramme de transition.

À partir de ce diagramme, nous avons défini les équations de balances du système markovien suivantes :

$$(\lambda + \varepsilon)P_0 = R\sigma + \mu Q_0, \quad (4.1)$$

$$(\lambda + \varepsilon)P_j = (1 - p)\lambda P_{j-1} + \mu Q_j, \quad j = 2, 3, \dots, \quad (4.2)$$

$$(\lambda + \varepsilon + \mu)Q_0 = \lambda p P_0, \quad (4.3)$$

$$(\lambda + \varepsilon + \mu)Q_j = \lambda p P_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, \quad (4.4)$$

$$\sigma R = \varepsilon \left(\sum_{j=0}^{\infty} P_j + \sum_{j=0}^{\infty} Q_j \right) \quad j = 1, 2, 3, \dots, \quad (4.5)$$

$$\sum_{j=0}^{\infty} P_j + \sum_{j=0}^{\infty} Q_j + R = 1 \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (4.6)$$

Pour résoudre les équations d'équilibre, nous avons utilisé les fonctions génératrices partielles suivantes

$$P(z) = \sum_{j=0}^{\infty} P_j z^j, \quad Q(z) = \sum_{j=0}^{\infty} Q_j z^j, \quad \text{and} \quad R(z) = \sum_{j=1}^{\infty} R_j z^j, \quad z \in [0, 1], \quad (4.7)$$

où $R(z)$ (respectivement $P(z)$, $Q(z)$) est la fonction génératrice des probabilités du nombre de clients en orbite lorsque le serveur est occupé par les PU_s (respectivement libre, occupé par les SU_s).

$$R = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma} < 1. \quad (4.8)$$

$R < 1$ alors Le système est stable.

La probabilité que le serveur est occupé est

$$Q(1) = \frac{\lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu} \times \frac{\sigma}{(\lambda + \varepsilon) - (1 - p)\lambda - \frac{\mu \lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu}} \times \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}. \quad (4.9)$$

La probabilité que le serveur est libre est

$$P(1) = \frac{\sigma}{(\lambda + \varepsilon) - (1 - p)\lambda - \frac{\mu \lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu}} \times \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}. \quad (4.10)$$

4.4 Caractéristiques du système

Le nombre moyen de clients L_q (respectivement L_s) en orbite (respectivement dans le système)

$$L_q = \frac{\sigma \varepsilon}{1 + \varepsilon} \times \frac{(1 - p)\lambda}{(\lambda + \varepsilon) - (1 - p)\lambda - \frac{\mu \cdot \lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu}}, \quad (4.11)$$

$$L_s = \left(\frac{\sigma \varepsilon}{1 + \varepsilon} + \frac{\lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu} \right) \times \frac{(1 - p)\lambda}{\left((\lambda + \varepsilon)(1 - p)\lambda - \left(\frac{\mu \lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu} \right) \right)^2}. \quad (4.12)$$

Le temps moyen d'attente W_q (respectivement W_s) en orbite (respectivement dans le système) est lié au nombre moyen de clients L_q (respectivement L_s) en orbite (respectivement dans le système) par la formule de Little [18], $W_s = \lambda \times L_s$ et $W_q = \lambda \times L_q$

$$W_q = \lambda \times \frac{\sigma \varepsilon}{1 + \varepsilon} \times \frac{(1 - p)\lambda}{(\lambda + \varepsilon) - (1 - p)\lambda - \frac{\mu \cdot \lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu}}, \quad (4.13)$$

$$W_s = \lambda \times \left(\frac{\sigma \varepsilon}{1 + \varepsilon} + \frac{\lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu} \right) \times \frac{(1 - p)\lambda}{\left((\lambda + \varepsilon)(1 - p)\lambda - \left(\frac{\mu \lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu} \right) \right)^2}. \quad (4.14)$$

4.5 Illustrations numériques

Dans cette section, nous présentons quelques exemples numériques afin d'étudier l'effet des paramètres du modèle sur les caractéristiques du système.

Dans la figure 4.2, nous avons représenté graphiquement l'impact du taux d'arrivée des paquets primaires λ sur le nombre moyen de clients en orbite L_q , en utilisant les paramètres $\mu = 0.8$, $s = 0.6$ et $p = 0.3$. Nous observons que pour trois valeurs de λ ($\lambda = 0.5$, $\lambda = 0.7$ et $\lambda = 0.9$), le nombre moyen de clients en orbite L_q diminue progressivement. Cela indique que, à mesure que le taux d'arrivée des paquets primaires augmente, la charge du système tend à diminuer.

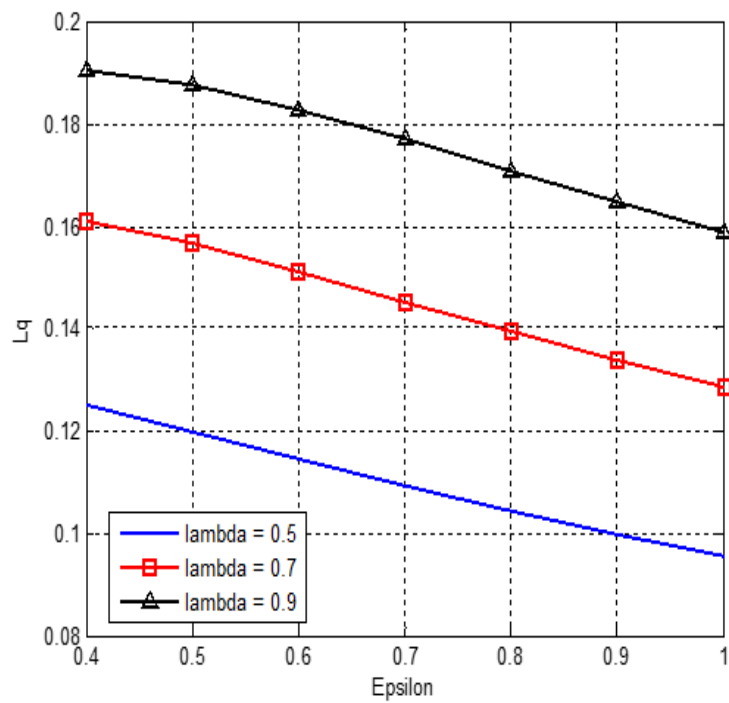


FIGURE 4.2 – L_q en fonction de ϵ pour différentes valeurs de λ .

Dans la figure 4.5, nous étudions l'évolution de L_q par rapport à μ pour trois valeurs de λ ($\lambda = 0.3$, $\lambda = 0.5$ et $\lambda = 0.9$). Pour ces applications numériques, nous fixons $\varepsilon = 0.2$, $\sigma = 0.3$ et $p = 0.4$. Nous observons que le nombre moyen de clients en orbite (L_q) augmente à mesure que le taux de service (μ) augmente, quelle que soit la valeur du taux d'arrivée des paquets secondaires (λ). Cela indique que les paquets secondaires sont plus susceptibles de rejoindre l'orbite plutôt que d'être servis immédiatement lorsque le taux de service augmente.

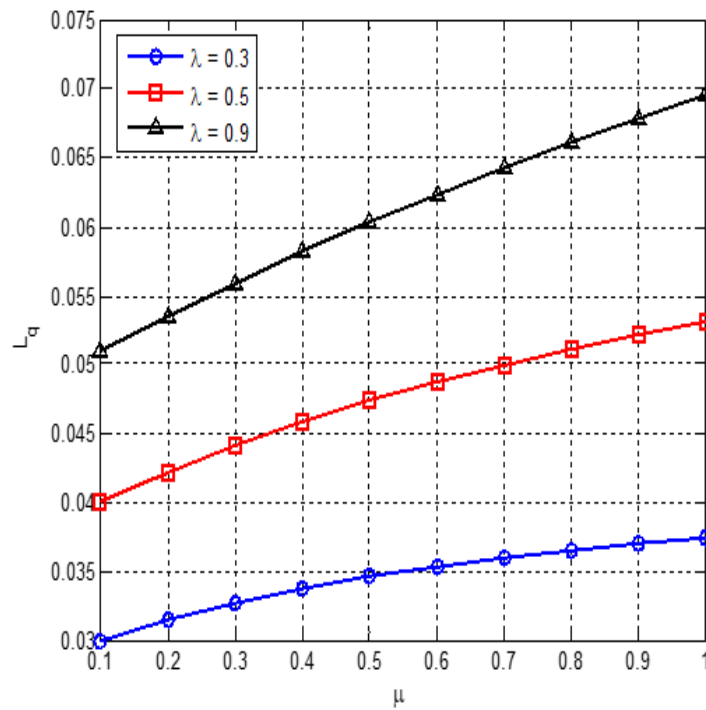


FIGURE 4.3 – L_q en fonction de μ pour différentes valeurs de λ .

La figure 4.5 explore l'évolution de L_q en fonction de λ pour trois valeurs de p ($p = 0.1$, $p = 0.5$ et $p = 0.9$), avec $\mu = 1$, $\sigma = 2$, et $\varepsilon = 1$. Nous observons que le nombre moyen de clients en orbite (L_q) augmente avec l'augmentation du taux d'arrivée des paquets secondaires (λ), indépendamment de la probabilité d'accès p . Cela s'explique par le fait qu'un taux d'arrivée plus élevé entraîne une accumulation plus rapide des paquets en orbite lorsque le serveur est occupé.

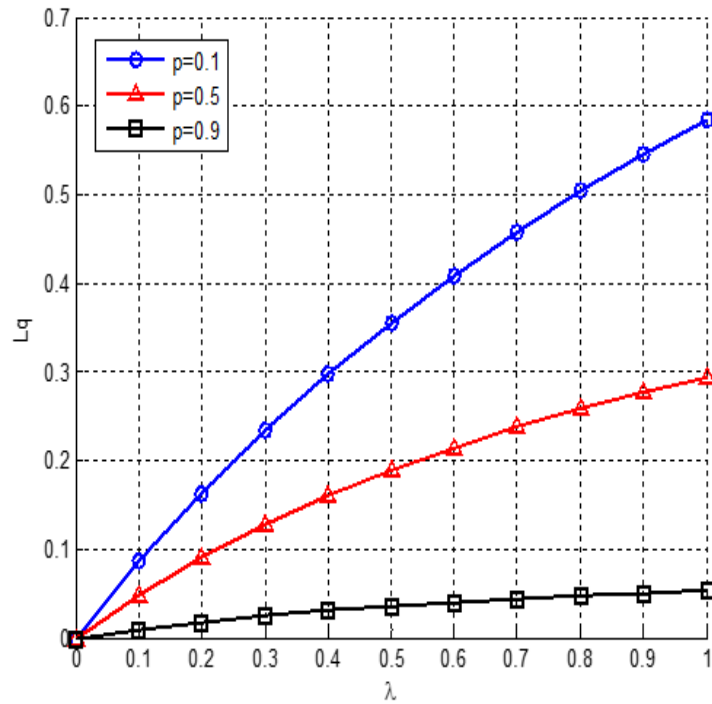


FIGURE 4.4 – L_q en fonction du taux d'arrivée λ .

Dans la figure 4.5, nous étudions l'évolution de W_q par rapport à λ pour trois valeurs de p ($p = 0.2$, $p = 0.5$ et $p = 0.8$), avec $\sigma = 1$, $\varepsilon = 0.5$, et $\mu = 1$. Nous observons une augmentation de W_q avec l'augmentation de λ pour toutes les valeurs de p indique que lorsque le taux d'arrivée des paquets secondaires λ augmente, le temps moyen d'attente des paquets en orbite dans le système également augmente, indiquant une saturation ou une charge plus importante sur le système, indépendamment de la probabilité d'accès au medium p pour les paquets secondaires. Cela suggère que la capacité du système à traiter les paquets en orbite est dépassée lorsque λ augmente, quel que soit le taux d'accès des paquets secondaires.

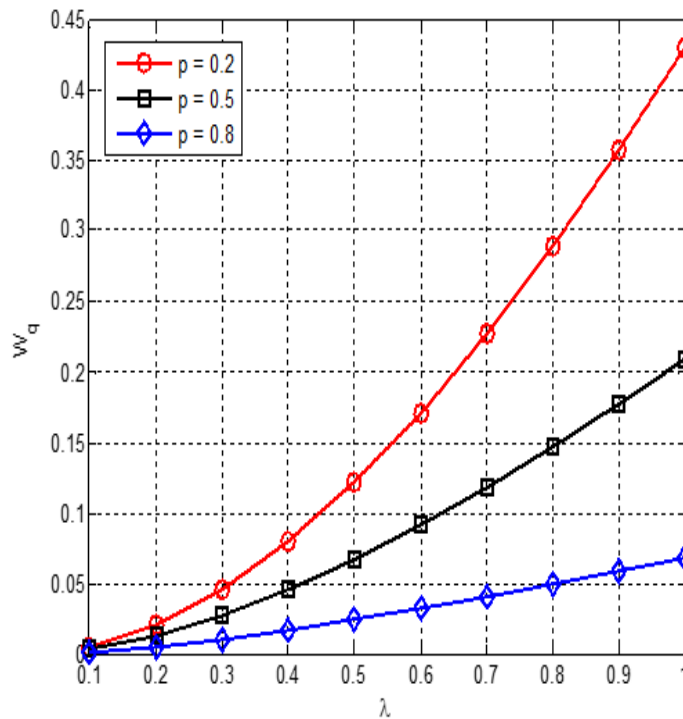


FIGURE 4.5 – W_q en fonction du taux d'arrivée λ .

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté un modèle essentiel pour comprendre le fonctionnement d'un système d'attente markovien avec rappels et perte de clients dans le contexte de la radio cognitive. En utilisant la théorie du processus de Markov, nous avons formulé les équations de balances associées au système, en mettant l'accent sur les fonctions génératrices pour déterminer les probabilités de l'état du serveur et la longueur de l'orbite à l'état stationnaire. Les caractéristiques clés du système ont été analysées pour une meilleure compréhension de ses performances.

Les illustrations numériques réalisées sous Matlab ont permis de visualiser et de valider notre modèle, apportant ainsi une dimension pratique à nos analyses théoriques. Ces résultats préliminaires constituent une base solide pour la suite de nos travaux, notamment dans le prochain chapitre où nous aborderons la prise en compte des erreurs de transmission.

Chapitre 5

Modélisation de la Radio Cognitive par un système d'attente $M/M/1$ avec rappels, perte de clients et erreurs de transmission

Introduction

Ce chapitre se concentre sur la modélisation de la Radio Cognitive à travers un système d'attente $M/M/1$ avec rappels, perte de clients et erreurs de transmission. Nous examinons le système d'accès aux canaux radio cognitifs en nous focalisant sur le service (transmission) des paquets des utilisateurs secondaires (SU) et l'impact du taux d'arrivée des paquets des utilisateurs primaires (PU) sur la qualité du service. Dans notre analyse, les clients sont représentés par les paquets des stations secondaires, tandis que le service fait référence à la transmission de ces paquets à travers le canal sans fil. L'arrivée d'un paquet primaire entraîne la perte de tous les paquets secondaires en cours de transmission, marquant ainsi la fin de la transmission des paquets primaires. Cela se traduit par un rappel pour le système lors des transmissions des stations secondaires.

Nous utilisons la méthode des fonctions génératrices pour dériver les distributions conjointes de l'état du serveur et de la longueur de l'orbite à l'état stationnaire, nous permettant d'obtenir différentes mesures de performance. En outre, nous présentons des illustrations numériques pour démontrer l'efficacité et l'applicabilité du modèle.

5.1 Description du modèle

Nous considérons le système d'attente $M/M/1$ avec rappels, Les paquets secondaire arrivent de l'extérieur du système selon un processus de Poisson de taux λ . À l'arrivée du paquet secondaire, si le médium est libre, ce paquet accède au médium avec une probabilité p ou rejoint l'orbite avec une probabilité $(1 - p)$. Le service est exponentiel de paramètre μ . Le client qui entre en service (le client secondaire ou le client provenant de l'orbite) est servi avec succès (sans erreur de transmission) et quitte le système avec probabilité $\gamma(0 < \gamma \leq 1)$ ou rejoint l'orbite due à une erreur de transmission avec une probabilité $(1 - \gamma)$. les paquets primaires arrivent selon un processus de Poisson de taux ε . Si un paquet primaire arrive, il accède directement au serveur, entraînant la perte de tous les paquets secondaire en orbite. Le service des paquets primaires se fait selon une loi exponentielle de taux σ .

Nous supposons que les temps de service des clients sont indépendants, suivent une distribution exponentielle de moyenne $1/\mu$ et les processus stochastiques impliqués dans le système sont mutuellement indépendants. Ce modèle est décrit par la chaîne bi-dimensionnelle. $C(t), X(t)$, où

$$C(t) = \begin{cases} 0 & \text{Si le médium est libre à l'instant } t; \\ 1 & \text{Si le médium est occupé par le serveur d'un paquet } SU \text{ à l'instant } t \\ & \text{par les } (SUs); \\ 2 & \text{Si le médium est occupé par le serveur d'un paquet } SU \text{ à l'instant } t \\ & \text{par les } (PUs). \end{cases}$$

$X(t) = j$, j est le nombre des clients en orbite.

Le processus $C(t), X(t); t = 0$ est une chaîne de Markov à temps continu, irréductible, apériodique et homogène dans le temps avec l'espace d'état

$$S = (0, j), (1, j), (2, 0) / j = 0, 1, \dots$$

5.2 Calcul de la distribution stationnaire

Soit $P_j = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{C(t) = 0, X(t) = j\}$, $Q_j = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{C(t) = 1, X(t) = j\}$ et $R_j = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{C(t) = 2, X(t) = 0\}$, $j \geq 0$, Elles représentent les distributions conjointes de l'état du serveur et de la longueur de l'orbite à l'état stationnaire.

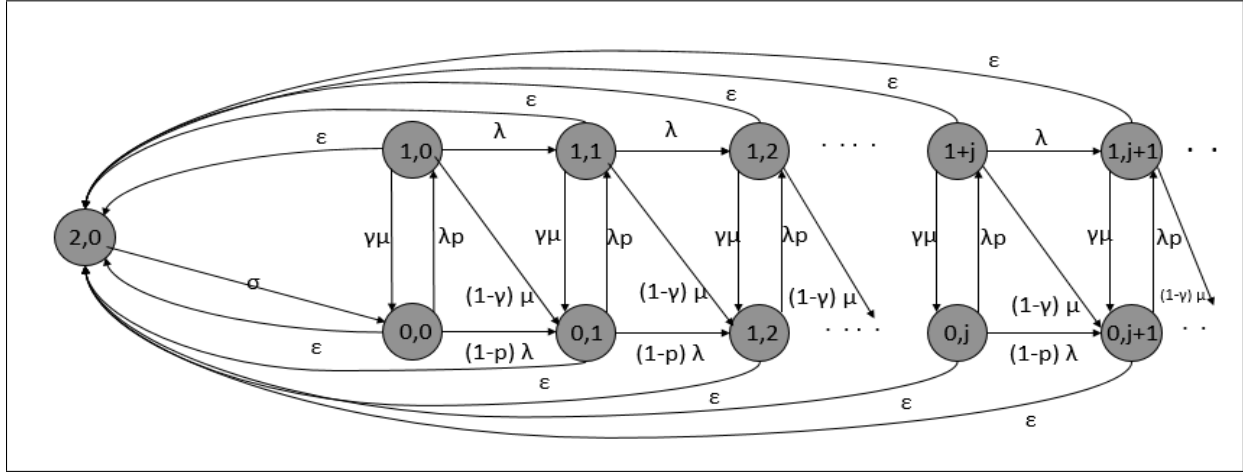


FIGURE 5.1 – Diagramme de transition.

À partir de ce diagramme, nous avons défini les équations de balances du système markovien suivantes :

$$(\lambda + \varepsilon)P_0 = R\sigma + \gamma\mu Q_0, \quad (5.1)$$

$$(\lambda + \varepsilon)P_j = (1 - p)\lambda P_{j-1} + \gamma\mu Q_j + (1 - \gamma)\mu Q_{j-1}, \quad j = 2, 3, \dots, \quad (5.2)$$

$$(\lambda + \varepsilon + \mu)Q_0 = \lambda p P_0, \quad (5.3)$$

$$(\lambda + \varepsilon + \mu)Q_j = \lambda Q_{j-1} + \lambda p P_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, \quad (5.4)$$

$$\sigma R = \varepsilon \left(\sum_{j=0}^{\infty} P_j + \sum_{j=0}^{\infty} Q_j \right) \quad j = 1, 2, 3, \dots, \quad (5.5)$$

$$\sum_{j=0}^{\infty} P_j + \sum_{j=0}^{\infty} Q_j + R = 1 \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (5.6)$$

$$P(z) = \sum_{j=0}^{\infty} P_j z^j, \quad Q(z) = \sum_{j=0}^{\infty} Q_j z^j, \quad \text{and} \quad R(z) = \sum_{j=1}^{\infty} R_j z^j, \quad z \in [0, 1], \quad (5.7)$$

où $R(z)$ (respectivement $P(z)$, $Q(z)$) est la fonction génératrice des probabilités du nombre de clients en orbite lorsque le serveur est occupé par les PU_s (respectivement libre, occupé par les SU_s).

$$R = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma} < 1. \quad (5.8)$$

$R < 1$ alors Le système est stable.

La probabilité que le serveur est occupé est

$$Q(1) = \frac{\lambda p}{\lambda + \varepsilon - \mu - \lambda} \times \frac{1}{(\lambda + \varepsilon) + (1 - p)\lambda - \frac{\lambda p(\gamma\mu + (1-\gamma)\mu)}{\lambda + \varepsilon - \mu - \lambda}} \times \sigma \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma}, \quad (5.9)$$

La probabilité que le serveur est libre est

$$P(1) = \frac{1}{(\lambda + \varepsilon) + (1 - p)\lambda - \frac{\lambda p(\gamma\mu + (1-\gamma)\mu)}{\lambda + \varepsilon - \mu - \lambda}} \times \sigma \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma}. \quad (5.10)$$

5.3 Caractéristiques du système

Le nombre moyen de clients L_q (respectivement L_s) en orbite (respectivement dans le système)

$$L_q = \frac{(1 - p)\lambda(\varepsilon - \mu)^2 - \lambda p(1 - \gamma)\mu(\varepsilon - \mu) + \lambda^2 p\mu}{((2\lambda + \varepsilon - \lambda p)(\varepsilon - \mu) - \lambda p\mu)^2} \times \sigma \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma}, \quad (5.11)$$

$$L_s = \frac{(1 - p)\lambda(\varepsilon - \mu)^2 - \lambda p(1 - \gamma)\mu(\varepsilon - \mu) + \lambda^2 p\mu}{((2\lambda + \varepsilon - \lambda p)(\varepsilon - \mu) - \lambda p\mu)^2} \times \sigma \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma} \times \frac{-\lambda^2 p}{(\varepsilon - \mu)^2}. \quad (5.12)$$

Le temps moyen d'attente W_q (respectivement W_s) en orbite (respectivement dans le système)

$$W_q = \lambda \times \frac{(1 - p)\lambda(\varepsilon - \mu)^2 - \lambda p(1 - \gamma)\mu(\varepsilon - \mu) + \lambda^2 p\mu}{((2\lambda + \varepsilon - \lambda p)(\varepsilon - \mu) - \lambda p\mu)^2} \times \sigma \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma}, \quad (5.13)$$

$$W_s = \lambda \times \frac{(1 - p)\lambda(\varepsilon - \mu)^2 - \lambda p(1 - \gamma)\mu(\varepsilon - \mu) + \lambda^2 p\mu}{((2\lambda + \varepsilon - \lambda p)(\varepsilon - \mu) - \lambda p\mu)^2} \times \sigma \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma} \times \frac{-\lambda^2 p}{(\varepsilon - \mu)^2}.$$

5.4 Illustrations numériques

Dans cette section, nous donnons quelques illustrations numériques pour étudier l'effet des paramètres du modèle sur les caractéristiques du système.

Dans la Figure 5.4 nous illustrons l'impact de γ sur L_q en fonction de λ pour trois valeurs de γ ($\gamma = 0.1$, $\gamma = 0.5$ et $\gamma = 1$). Les paramètres utilisés pour ces applications numériques sont $\mu = 0.3$, $\sigma = 0.5$, $\epsilon = 0.5$ et $p = 0.8$. Il est à noter que, quelle que soit la valeur de γ , le nombre moyen de clients en orbite L_q augmente avec le taux d'arrivée des paquets secondaires λ . De plus, des valeurs plus élevées de γ (probabilité de service réussi) entraînent une augmentation plus rapide de L_q .

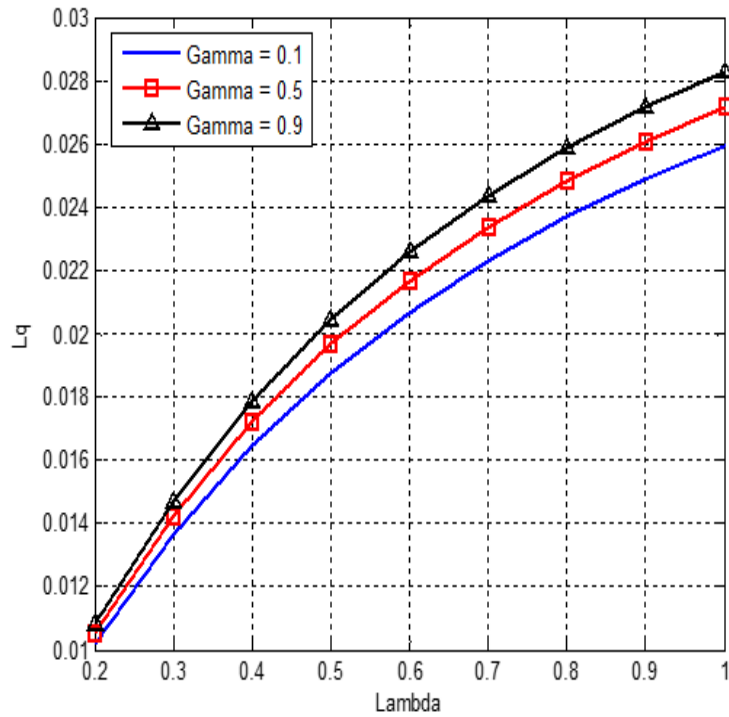


FIGURE 5.2 — L_q en fonction de λ pour différentes valeurs de γ .

Dans la figure 5.4, nous étudions l'évolution de L_q par rapport à μ pour trois valeurs de γ ($\gamma = 0.1$, $\gamma = 0.5$ et $\gamma = 1$). Pour ces applications numériques, nous fixons $\varepsilon = 0.5$, $\sigma = 0.5$, $\lambda = 0.8$ et $p = 0.5$. nous observons que le nombre moyen de clients en orbite (L_q) augmente à mesure que le taux de service μ augmente, quelle que soit la valeur de λ . Cela suggère que, malgré une augmentation de la capacité de service μ , le système génère davantage de clients en orbite en raison des rappels fréquents dus aux erreurs de transmission et à la probabilité de perte de clients secondaires.

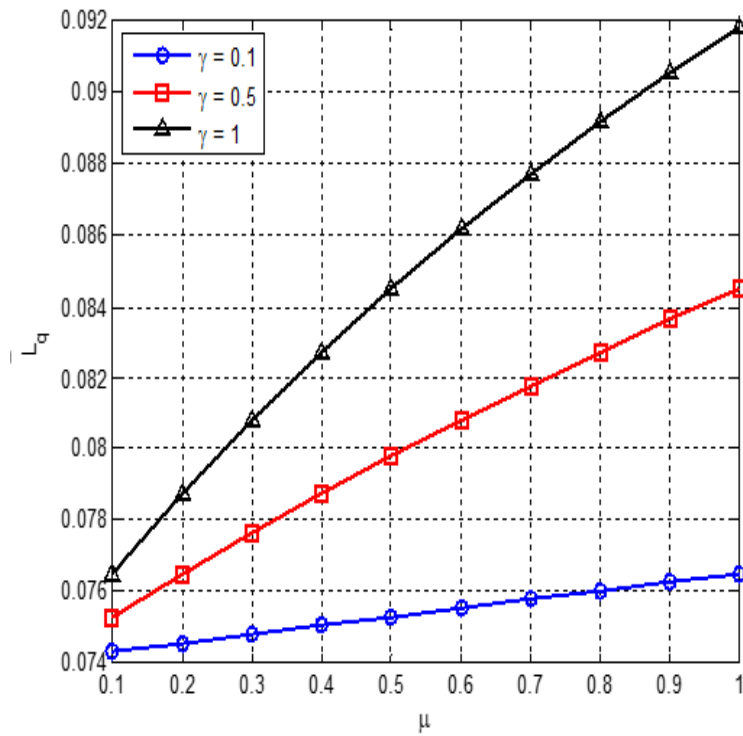


FIGURE 5.3 – L_q en fonction de μ pour différentes valeurs de γ .

Conclusion

En conclusion, ce chapitre nous a permis d'examiner le système d'attente $M/M/1$ avec rappels, perte de clients, et erreurs de transmission dans le contexte de la radio cognitive. Nous avons étudié l'accès aux canaux de radio cognitive, mettant l'accent sur le service des paquets SU_s et l'impact du taux d'arrivée de paquets des PU_s sur la qualité de service. En utilisant la méthode des fonctions génératrices, nous avons dérivé des distributions conjointes de l'état du serveur et de la longueur de l'orbite, permettant d'obtenir diverses mesures de performance. Les illustrations numériques ont démontré l'efficacité et l'applicabilité du modèle proposé. Cette analyse approfondie ouvre la voie à de futures recherches explorant les paramètres du modèle et leurs impacts sur les caractéristiques du système, ainsi qu'à l'extension de ce modèle à des scénarios plus complexes de radio cognitive.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à la modélisation des méthodes d'accès au canal sans fil en radio cognitive. Nous avons exploré les principes fondamentaux de la radio cognitive, son architecture, et ses applications potentielles. En particulier, nous avons mis l'accent sur l'interaction dynamique entre les utilisateurs primaires (PU) et les utilisateurs secondaires (SU), et la manière dont ces derniers peuvent exploiter de manière efficace les bandes du spectre non utilisées par les PU . Pour ce la, on a proposé deux modèles mathématiques utilisant les files d'attente pour illustrer la politique d'accès au canal à savoir :

1. Le modèle $M/M/1$ avec rappels et perte de clients.
2. Le modèle $M/M/1$ avec rappels, perte de clients et erreurs de transmission.

Pour analyser ces deux modèles, on a dû décrire leurs comportements via leurs équations de balance locales et en utilisant la méthode des fonctions génératrices nous avons pu obtenir leurs distributions stationnaires. Ces dernières nous ont permis de calculer certaines caractéristiques de ces systèmes. Enfin une étude de sensibilité de ces caractéristiques par rapports aux différents paramètres de qualité de service.

En conclusion, la radio cognitive se présente comme une technologie clé pour répondre aux défis croissants de la demande en communication sans fil et de l'utilisation efficace du spectre. Les travaux réalisés dans ce mémoire apportent une contribution significative à la compréhension et à la modélisation de ces systèmes complexes, ouvrant ainsi la voie à des recherches futures et à des applications pratiques dans le domaine des communications sans fil.

Bibliographie

- [1] N. Arrar. Problèmes de convergence, optimisation d'algorithmes et analyse stochastique de systèmes de files d'attente avec rappels, 2012.
- [2] J. R. Artalejo and A. Gómez-Corral. *Retrial queueing systems : A computational approach*. Springer, Berlin, 2nd edition, 2008.
- [3] F. Baccelli and P. Brémaud. *Elements of Queueing Theory*. Springer, New York, 2003.
- [4] A. Ben. Allocation dynamique des bandes spectrales dans les réseaux sans-fil à radio cognitive, 2011.
- [5] B. Benmammar and A. Amraoui. *Réseaux de radio cognitive Allocation des ressources radio et accès dynamique au spectre*. LTT Laboratoire de Télécommunications Tlemcen, UABT, Algérie, 2012.
- [6] M. Bkassiny, Y. Li, and S. K. Jayaweera. A survey on machine learning techniques in cognitive radios. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(3) :1136–1159, 2012.
- [7] D. Boukredera and K. Adel-Aissanou. Modeling and performance analysis of cognitive radio networks using stochastic timed colored petri nets. *Wireless Personal Communications*, 112 :1659–1687, 2020.
- [8] G. Falin and J. G. Templeton. *Retrial Queues*. CRC Press, 1997.
- [9] A. Goldsmith. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [10] S. Haykin. Cognitive radio : brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(2) :201–220, 2005.
- [11] E. Hossain, D. Niyato, and Zhu Han. *Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks*. Cambridge University Press, 2009.
- [12] D. G. Kendall. Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of the embedded markov chain. *The Annals of Mathematical Statistics*, pages 338–354, 1953.
- [13] L. Lakaouar. Modélisation, analyse et évaluation des méthodes d'accès au medium dans les réseaux sans fil, 2019.

- [14] L. Lakaour, D. Aïssani, K. Adel-Aïssanou, and K. Barkaoui. $M/M/1$ retrial queue with collisions and transmission errors. *Quality Technology and Quantitative Management*, 21 :1395–1406, 2019.
- [15] L. Lakaour, D. Aïssani, K. Adel-Aïssanou, K. Barkaoui, and S. Ziani. An unreliable single server retrial queue with collisions and transmission errors. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 51 :1659–1687, 2022.
- [16] O. Lekadir. Stabilité forte dans les réseaux de files d’attente, 2011.
- [17] K. Ben Letaief and Wei Zhang. Cooperative communications for cognitive radio networks. *Proceedings of the IEEE*, pages 878–893, 2009.
- [18] John DC Little. A proof of the queueing formula $l = \lambda w$. *Operations Research*, 9(3) :383–387, 1961.
- [19] J. Mitola and G. Q. Maguire. Cognitive radio : making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 6 :13–18, August 1999.
- [20] C. Rong and P. Jung-Min. *Cognitive Radio Networks*. Springer, 2010.
- [21] S. Ziani. Analyse des comportements stratégiques et recherche des équilibres dans les systèmes d’attente markoviens par groupe, 2015.
- [22] D. Zirem, M. Boualem, K. Adel-Aïssanou, and D. Aïssani. Analysis of a single server batch arrival unreliable queue with balking and general retrial time. *Quality Technology and Quantitative Management*, 16(6) :672–695, 2019.

Résumé

La radio cognitive (*RC*) est actuellement l'une des technologies de transmission d'informations les plus prometteuses pour résoudre le problème de la rareté et de la sous-utilisation du spectre dans les communications sans fil. Les réseaux sans fil visent à améliorer l'efficacité du spectre pour répondre aux demandes sans cesse croissantes des utilisateurs. Ainsi, dans ce mémoire, nous allons proposer deux modèles de file d'attente $M/M/1$ avec rappels pour modéliser le système de radio cognitive (*RC*) où les utilisateurs secondaires (*SU*) sont en concurrence pour l'utilisation du spectre, en utilisant l'accès aléatoire, sur les canaux disponibles des utilisateurs primaires (*PU*).

Pour analyser ce système de files d'attente considéré, nous avons appliqué la méthode des fonctions génératrices pour obtenir les distributions conjointes de l'état du serveur et la longueur de l'orbite à l'état stationnaire et ce afin de calculer par la suite certaines caractéristiques de ce système.

Keywords : Radio Cognitive, Files d'attente avec rappels, utilisateurs secondaires, utilisateurs primaires, Fonction génératrice.

Abstract

The cognitive radio (*RC*) is currently one of the most promising information transmission technologies for solving the problem of spectrum scarcity and under-utilisation in wireless communications. Wireless networks aim to improve spectrum efficiency to meet the ever-increasing demands of users.

Thus, in work, we proposed two $M/M/1$ queueing models with callbacks to model the cognitive radio system (*RC*) where secondary users (*SU*) compete for spectrum usage, using random access, on the available channels of primary users (*PU*).

To analyse the queueing system under consideration, we applied the generating function method to obtain the joint distributions of the server state and the orbit length in the stationary state, in order to subsequently compute some characteristics of the system.

Keywords : Cognitive Radio, retrial queues, Secondary users, Primary users, Generating function.