



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Abderrahmane MIRA de Béjaïa
Faculté des Sciences Exactes

Département de Recherche Opérationnelle

Mémoire Présenté pour L'obtention du Diplôme de Master
en Mathématiques Appliquées

Spécialité : Optimisation et Fiabilité des Réseaux de Communication

**Évaluation des performances de la Radio Cognitive via les
files d'attente et la théorie des jeux.**

Présenté par :
Amoura Massilia
Afoun Ilhem

Sous la direction de : Pr O.Lekadir
Et de : Pr K. Adel-Aissanou

Défendu le 29/06/2025, devant le jury composé de :

M ^r N. Touche	Professeur	Président du jury	UAMB - Bejaia.
M ^{me} L. Bachiri	MCA	Examinatrice	UAMB - Bejaia
M ^{lle} M. Talantikit	Doctorante	Examinatrice	UAMB - Bejaia.

Année Universitaire 2024 – 2025

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu de nous avoir accordé la force, la santé, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à nos encadrantes, *Mme Ouiza LEKADIR* et *Mme Karima ADEL-AISSANO*, pour la qualité de leur encadrement, la pertinence de leurs conseils, leur grande disponibilité et leur bienveillance constante tout au long de cette recherche.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer notre travail.

Nous exprimons notre reconnaissance à toutes celles et ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Dédicace

★ À mes très chers parents, piliers de ma vie, pour leur amour inestimable, leurs sacrifices constants et leur soutien indéfectible. Votre confiance en moi a été ma plus grande force.

★ À mes frères Massil et Mohand, pour leur présence rassurante, leur complicité et leurs encouragements.

★ À mes sœurs Asma, Anilia et Alaa, dont l'affection, la tendresse et les mots doux ont toujours été une source de réconfort et de motivation.

★ À toute ma famille et à mes amies, pour leur présence et leur soutien.

★*Amoura Massilia*★

Dédicace

★ *A mes très chers parents.*

★ *A mes frères Mouhamed , Tarek , Amine et ma sœur Aya.*

★ *À toute ma famille.*

★*Afoun Ilhem*★

Table des matières

Liste des figures	VI
Liste d'abrégations et notations	VII
Introduction générale	1
1 Les réseaux radio cognitive	3
1.1 Réseau sans fil	3
1.1.1 Définition	3
1.1.2 L'évolution des technologies de communication mobile	3
1.1.3 Mode de transmission	4
1.1.4 Règlements	5
1.2 Radio cognitive	5
1.2.1 Historique	6
1.2.2 Définition	6
1.2.3 Architecture	6
1.2.4 Fonctionnement	7
1.2.5 Cycle de cognition	8
1.2.6 Partage de spectre	9
2 Files d'attente et Théorie des jeux	12
2.1 Files d'attente	12
2.1.1 Chaines de Markov	12
2.1.2 Systèmes de files d'attente markoviens	12
2.1.3 Systèmes de files d'attente non markoviens	13
2.1.4 Description d'un système de files d'attente	13
2.1.5 Caractéristiques de base d'un système d'attente	14
2.1.6 Description du modèle M/M/1	15
2.1.7 Notation de Kendall	15
2.1.8 Formule de Little	16
2.1.9 Systèmes de files d'attente avec rappels	16
2.1.10 Description d'un système de file d'attente avec rappels	17
2.1.11 Politiques de rappels	18
2.1.12 Modèle M/M/1 avec rappels classiques	18
2.2 Théorie des jeux	19
2.2.1 Historique	19
2.2.2 Définition	19
2.2.3 Généralités	19
2.2.4 Classification des jeux	20

2.2.5	Présentation d'un jeu sous forme extensive et normale	21
3	État de l'art	24
3.1	Application de la théorie des jeux aux réseaux sans fil cognitifs : modélisation et optimisation des interactions	24
3.2	Gestion du Spectre et Protocoles de Routage dans les Réseaux Radio Cognitive : Approches Intelligentes et Adaptatives	25
3.3	Apport des Réseaux Radio Cognitifs et de la Théorie des Jeux dans l'Optimisation de l'Accès au Spectre	25
3.4	Stratégies décisionnelles des utilisateurs secondaires dans les réseaux radio cognitive : Théorie des jeux et optimisation sociale	25
3.5	Gestion du spectre dans les réseaux radio cognitifs : de la perte de paquets au stockage en buffer	26
3.6	Vers une architecture multi-agents pour la radio cognitive opportuniste	26
3.7	Optimisation de l'accès au spectre dans les réseaux radio cognitifs : Modélisation par la théorie des jeux et dynamique d'apprentissage adaptatif	27
3.8	Approches Coopératives de Détection de Brouillage en Régime Large-Bande : Vers une Intelligence Distribuée des Radios Cognitives	27
3.9	Partage du spectre dans les réseaux de capteurs sans fil cognitifs : Jeu de Bertrand et optimisation par colonies de fourmis	27
3.10	Modélisation de l'accès opportuniste au spectre dans les réseaux radio cognitive : approches par files d'attente et théorie des jeux	28
4	Modélisation de la Radio Cognitive par un système d'attente M/M/1 avec rappels et perte de clients	29
4.1	File d'attente	29
4.1.1	Description du modèle	29
4.1.2	Calcul de la distribution stationnaire	30
4.1.3	Caractéristiques du système	32
4.1.4	Illustrations numériques	32
4.2	Théorie des jeux	39
4.2.1	Les joueurs	39
4.2.2	Les stratégies	39
4.2.3	Les gains	39
4.2.4	La matrice des gains	40
4.2.5	Type de jeu	40
4.2.6	Équilibre de Nash	41
	CONCLUSION GÉNÉRALE	43
	Bibliographie	44

Table des figures

1.1	Schème d'un système de transmission numérique.	5
1.2	Architecture de la radio cognitive.	6
1.3	Cycle de cognition selon Mitola.	9
2.1	File d'attente.	14
2.2	Graphe de transition de la file M/M/1.	15
2.3	Schéma général d'un système de files d'attente avec rappels.	17
2.4	Forme extensive du jeu d'entrée sur un marché.	22
4.1	Diagramme de transition.	30
4.2	Lq en fonction de ϵ pour différentes valeurs de λ	33
4.3	Lq en fonction de μ pour différentes valeurs de λ	34
4.4	Lq en fonction de θ pour différentes valeurs de λ	35
4.5	Lq en fonction du taux d'arrivée λ	36
4.6	Wq en fonction du taux d'arrivée λ	37
4.7	Wq en fonction de θ pour différentes valeurs de λ	38

Liste d'abréviations et notations

- **RC** : Radio Cognitive.
- **RRC** : Réseaux de radio cognitive.
- **PU** : Utilisateur Primaire.
- **SU** : Utilisateur Secondaire.
- **PDA** : Assistant Digitale Personnelle.
- **GSM** : Global System for Mobile communication.
- **SMS** : Short Message System.
- **GPRS** : General Packet Radio Service.
- **UMTS** : Universal Mobile Telecommunication System.
- **CDMA** : Code Division Multi Access.
- **OFDMA** : orthogonal frequency-division multiple access.
- **MIMO** : Multi Instruction Multi Operation.
- **FCC** : Federal Communication Commission.
- **PAPS** : Premier Arrivé, Premier Servi.
- **FCFS** : First Come, First Served.
- **SP** : Perception sensoriell.
- **SDR** : Software Defined Radio.
- **KTH** : Institut Royal de Technologie.

- **SMA** : Systèmes multi-agents.
- **BBGA** : Bruit blanc gaussien additif.

Introduction générale

L'histoire du progrès humain est en lien direct avec l'évolution des technologies, notamment dans le domaine de la communication. Aujourd'hui, grâce aux réseaux sans fil, il est possible de transmettre des informations rapidement, efficacement et sans contraintes physiques. Cependant, cette liberté cache un défi important : l'utilisation du spectre radioélectrique reste souvent inefficace.

C'est dans ce contexte qu'apparaît la radio cognitive, une technologie intelligente capable de mieux gérer l'usage du spectre. Elle permet aux utilisateurs secondaires d'utiliser les fréquences momentanément libres sans déranger les utilisateurs primaires. Pour cela, elle repose sur des capacités d'observation, d'apprentissage et de décision autonome, ce qui en fait un outil puissant pour rendre les communications plus flexibles.

Pour analyser et optimiser le fonctionnement de cette technologie, les outils mathématiques jouent un rôle essentiel. Parmi eux, la théorie des files d'attente est particulièrement utile pour modéliser de manière probabiliste l'arrivée des utilisateurs dans un réseau ainsi que le processus de service. Elle permet de prendre en compte le phénomène d'attente, les délais d'attente, mais aussi les tentatives d'accès répétées au système, appelées "rappels". Les systèmes intégrant sont largement utilisés dans l'étude des réseaux de communication [23, 24]. Par exemple, les modèles de type M/M/1 avec rappels offrent une meilleure évaluation des performances de la radio cognitive dans des environnements dynamiques.

Par ailleurs, la théorie des jeux permet de comprendre les comportements stratégiques des utilisateurs qui partagent une même ressource comme le spectre. Dans les réseaux cognitifs, chaque utilisateur secondaire prend ses décisions en tenant compte des autres : rester, partir ou retenter sa chance. La théorie des jeux fournit alors un cadre pour analyser ces choix et concevoir des mécanismes d'accès au spectre qui soient efficaces et adaptables. En combinant la théorie des files d'attente et la théorie des jeux, on peut à la fois analyser le comportement du système sur le plan technique et comprendre les interactions stratégiques entre les utilisateurs dans les réseaux de communication modernes.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier comment la théorie des files d'attente et la théorie des jeux peuvent ensemble contribuer à améliorer les performances des réseaux radio cognitive. Pour cela, nous modélisons la transmission des utilisateurs secondaires avec un système M/M/1 avec rappels et intégrons leurs décisions stratégiques grâce à la théorie des jeux. Cette approche vise à optimiser à la fois le temps d'attente, l'accès au spectre et l'efficacité globale du réseau, tout en tenant compte des interférences causées par l'arrivée des utilisateurs primaires, qui peuvent interrompre les transmissions des utilisateurs secondaires et impacter le fonction-

nement du système.

Ce mémoire est constituée d'une introduction générale, de quatre chapitres, d'une conclusion générale et d'une bibliographie.

Dans le premier chapitre, nous présentons les bases des réseaux sans fil et de la radio cognitive, Nous y mettons l'accent sur les enjeux du partage du spectre, les architectures cognitives et les cycles de cognition.

Dans le deuxième chapitre nous décrivons les outils mathématiques utilisés dans la modélisation du système. La première partie est consacrée à la théorie des files d'attente, où nous attardons sur la modélisation des systèmes de type M/M/1 dotés de stratégies de rappels, utiles pour représenter les utilisateurs secondaires mis en attente lorsqu'un canal est occupé. La seconde partie introduit la théorie des jeux, dont nous présentons concepts fondamentaux (joueurs, stratégies, équilibre de Nash, jeux coopératifs/non coopératifs, etc.) et leur application dans le contexte de la radio cognitive, où les utilisateurs adoptent des comportements stratégiques dans un environnement à ressources partagées.

Le troisième chapitre constitue une revue structurée des contributions scientifiques pertinentes. Nous y mettons en lumière les contributions des chercheurs ayant utilisé les chaînes de Markov, la théorie des jeux et les files d'attente pour modéliser et optimiser les performances des réseaux radio cognitive. Nous présentons plusieurs approches, notamment celles liées à la gestion du spectre, aux protocoles de routage, à la détection coopérative, à l'intelligence distribuée ou encore à la modélisation multi-agents. Cette synthèse nous aide à mieux situer notre travail et à montrer l'intérêt du modèle que nous présentons dans le chapitre suivant.

Le quatrième chapitre est la contribution principale de notre travail. Nous y proposons un modèle mathématique combinant un système de file d'attente de type M/M/1 avec rappels et pertes de clients intégré dans un cadre de décision stratégique fondé sur la théorie des jeux. La première partie du chapitre 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. Dans la seconde partie, nous introduisons un modèle de profit qui reflète les décisions rationnelles des utilisateurs secondaires selon leur stratégie : entrer dans le système, patienter ou se retirer. L'objectif est d'optimiser leur utilité individuelle tout en tenant compte des conditions dynamiques du réseau.

En résumé, dans ce mémoire nous avons proposé une approche originale combinant la théorie des files d'attente et la théorie des jeux pour modéliser et optimiser le comportement des utilisateurs dans les réseaux radio cognitive. Cette approche permet de mieux gérer l'utilisation du spectre radio en tenant compte à la fois du fonctionnement technique du réseau et des choix stratégiques des utilisateurs.

1

Les réseaux radio cognitive

Introduction

Dans ce chapitre, nous dressons un panorama général du domaine des réseaux sans fil avant de focaliser notre attention sur les réseaux de radio cognitive. Ces derniers représentent une évolution majeure des systèmes de communication, apportant une réponse intelligente à la gestion inefficace du spectre radioélectrique. Nous présenterons leur architecture, leur fonctionnement ainsi que les principes qui les sous-tendent, tels que le cycle de cognition et les différentes méthodes de partage du spectre.

1.1 Réseau sans fil

1.1.1 Définition

Un réseau sans fil (en anglais Wireless network) est comme son nom l'indique, toute possibilité de communications dans lequel au moins deux terminaux (des ordinateurs, PDA, imprimantes sans fil), sans liaison physique (câbles coaxial, paire torsadé, fibre optique...), ou chaque terminal doit posséder un dispositif (carte réseau, antenne) pour pouvoir accéder à ce réseau et échanger des données avec les autres terminaux. Ce réseau permet aux usagers de rester connectés tout en se déplaçant dans la zone de couverture, qui peut être plus ou moins étendue.

1.1.2 L'évolution des technologies de communication mobile

Les réseaux sans fil ont évolué à travers plusieurs générations au fil du temps. La première génération correspondait aux réseaux sans fil analogiques. Lorsqu'une connexion était établie entre deux entités, le système attribuait une fréquence spécifique à cette communication, laquelle ne pouvait être utilisée que par l'émetteur et le récepteur concernés. Cette fréquence

restait dédiée à l'échange en cours, empêchant ainsi toute réutilisation, même en l'absence de transmission effective.

Pour pallier cette limitation, la deuxième génération, connue sous le nom de GSM (Global System for Mobile communication) apparue pour remplacer la première génération analogique, qui appelée aussi technologie circuit numérique, en cette génération le signal est changé vers signal numérique, le GSM fonctionne dans les bandes de fréquences 900 MHz et 1800 MHz et dont le débit est de 9.6 Kbit/s suffit pour transmettre la voix et une quantité limitée de donnée comme les SMS (Short Message Service) et le MMS (multimédia Message Service), les données sont numérisées et envoyées, alors il n'y a pas une notion de paquet, cette notion qui donne naissance à la technologies 2.5 G appelée GPRS (Global Paquet Radio Service) qui a été introduite à côté des circuits GSM la possibilité d'utiliser des tranches de temps afin d'envoyer des paquets de façon asynchrone. Le débit devient 5 fois plus grand en comparant avec le débit GSM d'où les développeurs pourraient faire un pas vers la navigation internet, mais sa reste une pseudo-navigation car le débit reste toujours limitée. UMTS qui est une spécification de la 3G la technologies attendue par les utilisateurs qui aiment surfer sur internet avec plus de liberté, cette technologie se base sur le CDMA (Code Division Multiple Access) l'apport le plus important par cette technologie est le débit qui peut atteindre jusqu'à 2Mb/s ce qui permet d'aller plus loin avec le mobile, par exemple : les application temps réel et la visiophonie, et avec la 4G nous pouvons nous connectons n'importe ou et n'importe quand avec un débit plus considérable. Grâce à la méthode de modulation OFDMA et avec une nouvelle technologie d'antennes multiples qui est le MIMO que le Wi MAX mobile prétend satisfaire les besoins des utilisateurs mobiles et il peut être un bon concurrent à l'UMTS et constituer la technologie du futur pour une 4ème génération qui n'est pas encore complètement défini [1].

1.1.3 Mode de transmission

Dans le monde du sans fil ils existent deux modes de transmission :

Mode analogique

Dans ce mode, les informations circulent sous forme analogique, ce système est dépassé à cause de ses limites (sensible aux bruit, la communication n'est pas fiable ...) et remplacé par le mode numérique qui semble plus fiable jusqu'à maintenant.

Mode numérique

Dans ce mode, le signal est transmis en format numérique, c'est-à-dire une série de bits représentant 1 et 0 produite par une technique connue sous le nom de modulation. Cette méthode permet d'adapter le signal à un format approprié lors de sa transmission. Le signal sera démoulé à la réception afin d'être interprété par l'appareil destinataire. Prenons un exemple basique : le modem ADSL, dont le nom signifie modulateur/démodulateur, effectue de la modulation lors de l'envoi des données et de la démodulation lors de leur réception.

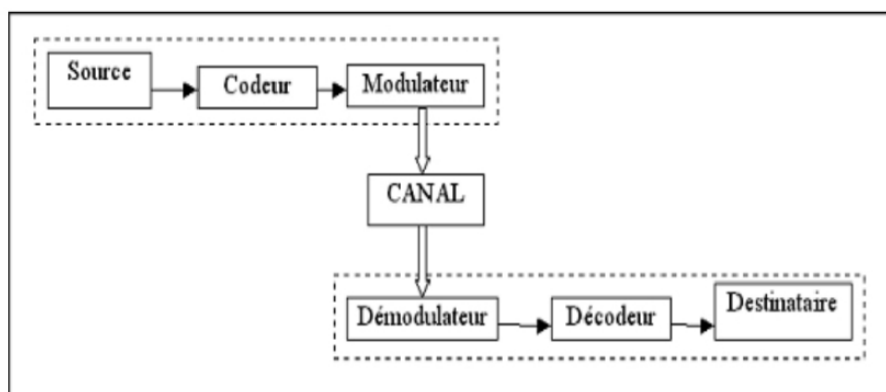


FIGURE 1.1 – Schéma d'un système de transmission numérique.

1.1.4 Règlementation

le FCC (Federal Communication Commission) alloue à chaque pays une plage de fréquences, à cause de la croissance des applications utilisant le sans fil (radio, opérateur, l'armée, la navigation ...) qui ne cessent pas d'augmenter, alors au niveau de chaque pays, l'autorité concernée doit gérer et diviser la plage des fréquences aux nombre de ces usagers désirant avoir l'autorité sur une fréquence ou bande de fréquences et délivre à chaque utilisateur une licence d'utilisation, cet usager est appelé utilisateur primaire (Primary User) de la fréquence, il possède tous les droits d'utilisation [2].

1.2 Radio cognitive

Parler de la radio cognitive implique forcément de considérer la radio logicielle, à l'origine de cette avancée technologique : la radio cognitive.

La radio logicielle est une radio dans laquelle les fonctions typiques de l'interface radio généralement réalisées en matériel, telle que la fréquence porteuse, la largeur de bande du signal, la modulation et l'accès au réseau sont réalisés sous forme logicielle. La radio logicielle moderne intègre également l'implantation logicielle des procédés de cryptographie, codage, correcteur d'erreur et le codage source de la voix de la vidéo ou des données [3].

Cependant, la croissance des télécommunications engendre une multiplication des normes, les fréquences radio, qui sont déjà largement distribuées par les régulateurs tels que la FCC, devenant difficiles à se procurer. Mais, ces fréquences ne sont pas utilisées uniformément : elles sont saturées en heures de pointe mais inutilisées à d'autres heures, comme la nuit. Cette mauvaise gestion freine le développement des communications sans fil, rendant nécessaire une approche plus intelligente de l'allocation du spectre. C'est dans ce contexte que la radio cognitive intervient, en analysant dynamiquement l'environnement pour utiliser efficacement les fréquences disponibles.

1.2.1 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. J. Mitola III est souvent considéré comme le "Père de la radio logicielle" [4], il combine son expérience de la radio logicielle ainsi que sa passion pour l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle pour mettre en place la technologie de la radio cognitive.

1.2.2 Définition

La radio cognitive, définie par la norme IEEE 802.22, est une technologie sans fil qui maximise l'usage du spectre radio en détectant et en utilisant les fréquences inutilisées sans perturber les utilisateurs principaux (PU). Elle autorise les utilisateurs secondaires (SU) à avoir un accès temporaire à ces fréquences, tout en donnant aux utilisateurs principaux l'opportunité d'exploiter leur spectre inutilisé. Grâce à cette gestion intelligente des ressources radio par la radio cognitive permet d'optimiser l'efficacité spectrale tout en diminuant les interférences.

1.2.3 Architecture

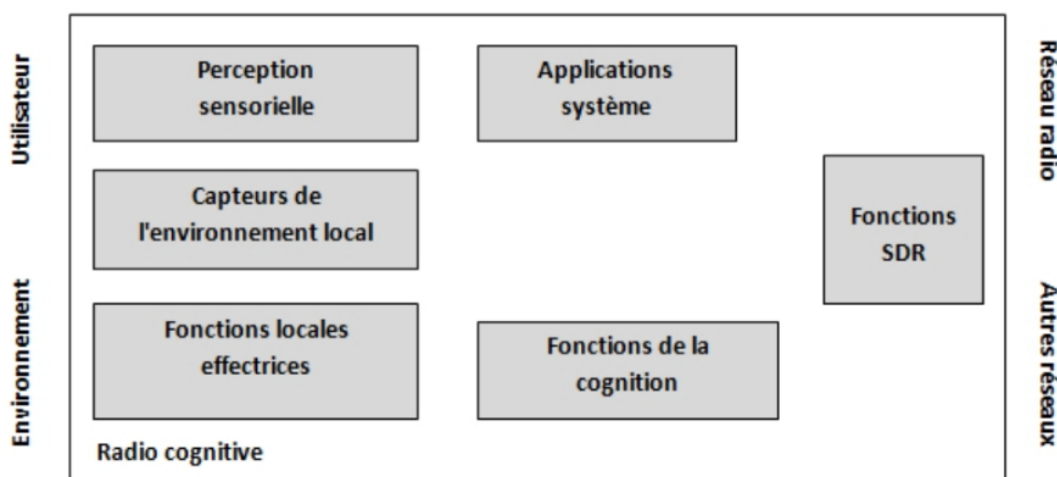


FIGURE 1.2 – Architecture de la radio cognitive.

L'architecture d'une radio cognitive repose sur six composantes clés :

- **Perception sensorielle (SP)** : Interface avec l'utilisateur via le toucher, le son, la vidéo et divers capteurs de perception.
- **Capteurs de l'environnement locale** : Collecte de données sur l'environnement (position, température, mouvement, etc.).

- **Applications système** : Services indépendants comme les jeux en réseau ou les applications multimédias.
- **Fonctions SDR (Software Defined Radio)** : Gestion dynamique des fréquences et détection des signaux radio.
- **Fonctions de la cognition** : Analyse des données, planification et apprentissage pour optimiser les performances.
- **Fonctions locales effectrices** : Synthèse vocale, affichage graphique et génération de contenus multimédias.

1.2.4 Fonctionnement

Les fonctions qui suivent sont essentielles pour le bon fonctionnement de la radio cognitive.

Détection de spectre

Cette phase a pour objectif la détection de l'état de spectre soit libre ou utilisé, afin de le partager avec son utilisateur primaire tout en évitant toutes interférences. Le défi réside dans le fait de mesurer l'interférence au niveau du récepteur primaire causée par les transmissions d'utilisateurs secondaires [5].

Gestion de spectre

Une fois que tous les canaux potentiellement utilisables ont été identifiés lors de la phase précédente, la radio cognitive doit sélectionner celui qui offre les meilleures performances en fonction des exigences de l'application et de la qualité de service requise. Pour simplifier cette sélection, deux catégories de fonctions ont été mises en place :

- **Analyse de spectre**

À cette étape, la radio cognitive attribue à chaque canal détecté un coefficient de qualité, basé sur des paramètres tels que le rapport signal/bruit. Cependant, ces informations ne sont pas toujours fiables, car elles peuvent être imprécises ou affectées par du bruit. Pour surmonter cette incertitude, l'intelligence artificielle propose des solutions adaptées, notamment les algorithmes d'apprentissage, qui permettent d'améliorer l'analyse et l'évaluation des canaux de manière plus efficace.

- **Modèle de décision**

L'accès au spectre repose sur un modèle de décision dont la complexité dépend des paramètres analysés lors de l'évaluation du spectre. Cette complexité augmente lorsque l'utilisateur secondaire poursuit plusieurs objectifs simultanément, comme utiliser le spectre sur une durée déterminée tout en évitant les interférences avec l'utilisateur primaire. Parmi les approches les plus adaptées pour optimiser cette prise de décision, les méthodes d'optimisation stochastiques (les processus de décision de Markov).

- **Compétition / coopération dans un environnement a plusieurs utilisateurs**

Lorsque plusieurs utilisateurs, qu'ils soient primaires ou secondaires, partagent un même système, leurs préférences influencent les décisions d'accès au spectre, on distingue alors deux approches : coopérative et non coopérative. Dans un environnement non coopératif, chaque utilisateur agit de manière autonome en poursuivant son propre objectif, sans se soucier des autres. À l'inverse, dans un environnement coopératif, les utilisateurs collaborent pour atteindre un but commun. plusieurs utilisateurs secondaires peuvent coopérer les uns avec les autres pour accéder au spectre radio.

- **Mise en œuvre distribuée du contrôle d'accès au spectre**

Dans un environnement distribué avec plusieurs utilisateurs et un accès non coopératif au spectre, chaque utilisateur peut prendre une décision optimale de façon indépendante en analysant le comportement et les actions passées des autres utilisateurs. Ainsi, pour permettre à un utilisateur secondaire de décider de manière autonome, l'utilisation d'un algorithme distribué s'avère essentielle.

Mobilité de spectre

Lorsqu'un utilisateur secondaire bascule vers une fréquence plus optimale, les réseaux de radio cognitive adaptent dynamiquement l'utilisation du spectre afin d'offrir aux utilisateurs la meilleure bande de fréquences disponible. Pendant cette transition, il est essentiel de garantir une communication fluide et sans interruption. L'objectif de la mobilité spectrale est donc d'assurer un changement rapide et efficace vers une nouvelle fréquence tout en maintenant la qualité du service.

1.2.5 Cycle de cognition

Ce cycle synthétise la composante cognitive de l'architecture de la radio cognitive qui comprend une organisation temporelle, des flux d'inférences et des états de contrôle de manière évidente. Les stimuli entrent dans la radio cognitive comme des interruptions sensorielles envoyées sur le cycle de la cognition pour une réponse [9]. Une telle radio cognitive observe l'environnement, s'oriente, crée des plans, décide, et puis agit.

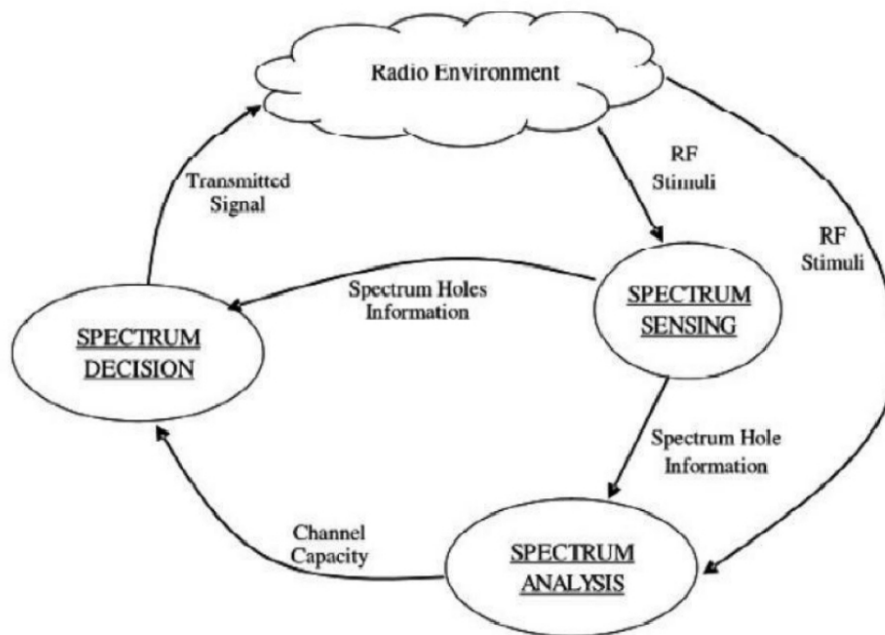


FIGURE 1.3 – Cycle de cognition selon Mitola.

- **Observation** : Détecte et perçoit l'environnement (emplacement, température, lumière) en reliant aux expériences passées.
- **Orientation** : Évalue l'importance des stimuli ; déclenche des actions immédiates si nécessaire ; transfère des infos à la mémoire longue pendant le sommeil.
- **Planification** : Génère des plans en réponse aux stimuli ; utilise des modèles formels pour planifier en fonction des perceptions et préférences utilisateur.
- **Action** : Exécute les plans via des effecteurs (messages, contrôle radio, mises à jour internes).
- **Apprentissage** : Compare constamment les perceptions aux expériences ; crée de nouveaux modèles en réponse aux actions.

1.2.6 Partage de spectre

Dans les réseaux de radio cognitive, un défi important est le partage des bandes spectrales, que ce soit entre plusieurs réseaux ou à l'intérieur d'un même réseau. Ce problème est similaire à celui de l'accès au médium dans les réseaux sans fil traditionnels [10]. Toutefois, la présence de différents types d'utilisateurs (PU et SU) et la disponibilité de grandes bandes spectrales rendent ce partage un peu plus complexe.

Définition

Le partage des bandes spectrales dans les réseaux radio cognitive est le fait que l'utilisateur secondaire utilise les bandes fréquences non utilisés par leur utilisateur primaire.

Classification des techniques de partage de spectre

Les techniques de partage spectral présentées dans [10] sont classées selon plusieurs critères : l'architecture du réseau, le comportement des SUs vis-à-vis de l'accès au spectre, ainsi que les méthodes d'accès aux bandes spectrales.

- Nous débutons par la première classification, qui repose sur l'architecture du réseau :

Partage spectral dans une architecture centralisée : Dans cette technique, c'est un serveur central qui se charge de gérer l'accès au spectre. Chaque SU effectue localement une détection des fréquences disponibles, puis envoie ces infos au serveur. Ce dernier analyse toutes les données reçues, puis décide quelle bande attribuer à quel utilisateur en créant une table d'allocation.

Partage spectral dans une architecture distribuée : Dans une architecture distribuée, il n'y a pas de serveur central, chaque SU fait sa propre détection du spectre et choisit lui-même les bandes qu'il peut utiliser, sans dépendre d'une coordination centrale. Cette approche est pratique quand il est difficile de mettre en place une infrastructure centralisée.

Le partage spectral au sein d'un réseau radio cognitive : Le partage de spectre peut s'effectuer dans le même réseau de radio cognitive ou entre deux ou plusieurs réseaux de radio cognitive.

- Passons maintenant à la deuxième technique, qui est basée sur le comportement des SUs dans le contexte du partage du spectre. Cette approche s'intéresse à la façon dont les SUs exploitent les ressources spectrales disponibles, en tenant compte de la présence des PUs. Plusieurs modèles de comportement peuvent être envisagés, notamment : **l'accès opportuniste, l'accès prioritaire et l'accès à la demande.**

- Ensuite, la troisième technique concerne les méthodes d'accès aux bandes spectrales, qui permettent aux SU d'exploiter le spectre pour leurs transmissions :

Accès direct ou d'onde porteuse : Les SUs accèdent directement à une bande spécifique, en envoyant des données, généralement sans interférer avec les PUs.

Accès par contournement : Les SUs utilisent des fréquences inutilisées en contournant les règles classiques d'accès, souvent dans des réseaux de radio cognitive.

Accès par opportunisme adaptatif : Les SUs détectent en temps réel la disponibilité du spectre et ajustent leur utilisation pour optimiser l'efficacité et minimiser les interférences avec les PUs.

Conclusion

La radio cognitive s'impose aujourd'hui comme une technologie clé pour l'optimisation du spectre radio. Grâce à ses capacités d'adaptation, d'apprentissage et de prise de décision autonome, elle ouvre la voie à des communications plus efficaces et dynamiques des utilisateurs primaires. Ce cadre technologique constitue la base sur lequel reposent les modèles que nous allons approfondir dans les chapitres suivants.

2

Files d'attente et Théorie des jeux

Introduction

Dans ce chapitre, nous introduisons deux outils mathématiques essentiels à la modélisation des réseaux de communication modernes : la théorie des files d'attente et la théorie des jeux. D'une part, les files d'attente permettent de modéliser la congestion et les délais dans les systèmes de communication. D'autre part, la théorie des jeux fournit un cadre puissant pour analyser les interactions stratégiques entre utilisateurs partageant des ressources communes, telles que le spectre radio.

2.1 Files d'attente

2.1.1 Chaines de Markov

Une chaîne de Markov est un processus aléatoire discret dans lequel la probabilité de l'état futur dépend uniquement de l'état présent, et non de la suite des états antérieurs, c'est ce qu'on appelle la propriété de Markov.

2.1.2 Systèmes de files d'attente markoviens

Les systèmes de files d'attente markoviens se caractérisent par des temps entre les arrivées et des durées de service qui suivent des lois exponentielles indépendantes. La propriété d'absence de mémoire associée à la loi exponentielle facilite considérablement l'analyse de ces systèmes. Cette analyse repose sur l'introduction d'un processus stochastique approprié, souvent noté $X(t)$, $t \geq 0$, qui représente le nombre de clients présents dans le système à un instant donné t . L'évolution de ce processus markovien $X(t)$ est entièrement déterminée par l'absence de mémoire des lois sous-jacentes.

2.1.3 Systèmes de files d'attente non markoviens

En l'absence de l'exponentialité ou lorsque l'on s'écarte de l'hypothèse d'exponentialité de l'une des deux quantités stochastiques : le temps des inter-arrivées et la durée de service, ou en prenant en compte certaines spécificités des problèmes par introduction de paramètres supplémentaires, on aboutit à un modèle non markovien. La combinaison de tous ces facteurs rend l'étude mathématique du modèle très délicate, voire impossible- on essaye alors de se ramener à un processus de Markov judicieusement choisi à l'aide de l'une des méthodes d'analyse suivantes :

- **Méthode de la chaîne de Markov induite**

cette approche, développée par **Kendall**, implique le choix d'une séquence d'instantanés $(1, 2, 3, \dots, n)$ (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].

- **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 enrichi :

$$(X(t), A(t_1), A(t_2), \dots, A(t_n))$$

où les variables $A(t_k)$, appelées *variables auxiliaires*, sont choisies pour capturer l'information manquante qui empêche $X(t)$ d'être un processus markovien.

- **Méthode des événements actifs**

cette approche consiste à introduire des *événements actifs* afin de donner une interprétation probabiliste aux transformées de Laplace et aux variables aléatoires décrivant le système étudié.

2.1.4 Description d'un système de files d'attente

Les files d'attente représentent un phénomène typique de la vie moderne. On les retrouve dans une grande variété de contextes : guichets de poste, centres d'appel, ateliers de réparation, et bien d'autres encore.

L'analyse mathématique de ces situations fait appel aux processus stochastiques et constitue un domaine d'étude important. On parle de phénomène d'attente chaque fois que des entités, appelées "clients", se présentent de manière aléatoire à des "stations" pour recevoir un service dont la durée est elle aussi généralement aléatoire. Si un poste de service est disponible, le client y est immédiatement pris en charge ; dans le cas contraire, il rejoint une file d'attente où les clients sont organisés selon une règle précise.

Une file d'attente est donc un système composé d'un ou plusieurs serveurs et d'un espace destiné à accueillir les clients en attente. Ces derniers arrivent de l'extérieur, peuvent être amenés à patienter, reçoivent un service, puis quittent le système une fois le service terminé.

La figure 2.1 présente un exemple simple d'une file d'attente comportant un seul serveur et une capacité d'attente illimitée.

Pour décrire complètement un système de file d'attente, il est nécessaire de spécifier trois éléments : le processus d'arrivée des clients, le temps de service, ainsi que l'organisation de la file et la discipline selon laquelle les clients sont servis.

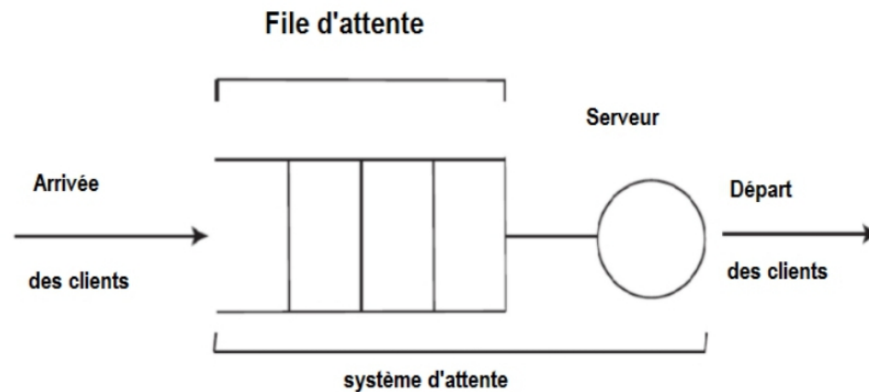


FIGURE 2.1 – File d'attente.

2.1.5 Caractéristiques de base d'un système d'attente

Les éléments principaux utilisés pour décrire un système de files d'attente classique sont les suivants :

Le processus d'arrivée des clients au système

Dans un système, l'arrivée des clients dépend à la fois de l'intervalle entre chaque arrivée et de leur mode de venue, que ce soit un par un ou en groupe. En cas d'arrivées groupées, le nombre de clients peut être fixe ou varier, ces clients peuvent provenir d'une source en nombre limité ou illimité.

Le processus de service

Le processus de service définit les modalités de prise en charge des clients, en précisant la durée moyenne du service, qui peut être déterministe ou aléatoire selon une loi de distribution. Il peut s'agir d'un service individuel ou collectif.

Le nombre de serveurs

Le système peut disposer d'un ou plusieurs serveurs fonctionnant en parallèle. Lorsqu'un client trouve plusieurs serveurs disponibles, il en choisit un au hasard. Si aucun serveur n'est libre, il patiente dans une file d'attente, qui peut être commune à tous les serveurs ou propre à chacun d'eux, selon l'organisation du système.

La capacité de la file du système

Le système peut prévoir une file d'attente de capacité illimitée ou restreinte. Lorsque la capacité est limitée les nouveaux clients ne peuvent pas entrer si l'espace est déjà plein, ils sont alors refusés ce qui définit un système dit « à pertes ».

La discipline de service

La discipline de service détermine la manière dont les clients sont ordonnancés pour accéder au service. Il existe plusieurs types de disciplines, mais la plus couramment utilisée est celle du *Premier Arrivé, Premier Servi* (PAPS), connue également sous son acronyme anglais *First Come, First Served* (FCFS).[4]

2.1.6 Description du modèle M/M/1

La file M/M/1 est la file d'attente markovienne la plus simple. Elle permet en effet d'illustrer les concepts fondamentaux liés à l'attente devant un serveur, le flot des arrivées est poissonien de taux λ et le temps qu'occupe le serveur pour satisfaire le client est une loi exponentielle du paramètre μ .

La file M/M/1 est un cas particulier du processus de naissance et de mort, où chaque arrivée d'un client est considérée comme une naissance (taux de naissance est égale à λ), et chaque départ est assimilé à une mort (taux de mort égale à μ).

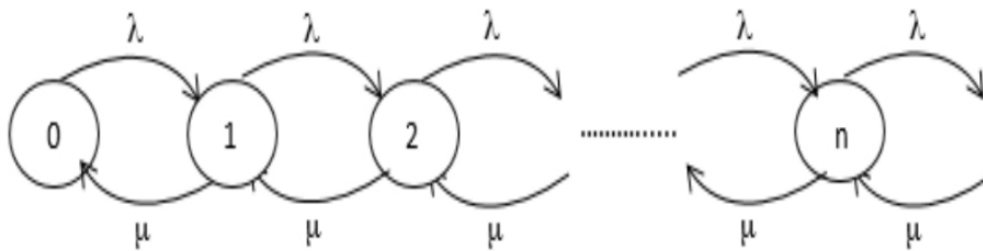


FIGURE 2.2 – Graphe de transition de la file M/M/1.

2.1.7 Notation de Kendall

La classification des systèmes de files d'attente utilise une notation symbolique introduite par [13], comprenant six symboles disposés dans l'ordre suivant :

$$A/B/s/N/K/D_s$$

où :

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

Voici une liste des distributions de probabilité couramment utilisées pour les paramètres A et B, avec leurs symboles respectifs :

- **M** : Distribution markovienne (arrivées selon un processus de Poisson et temps de service exponentiels)
- **E_k** : Distribution d'Erlang d'ordre k
- **D** : Distribution déterministe
- **H_k** : Distribution
- **G** : Distribution générale
- **GI** : Distribution générale indépendante.

Les principales disciplines de service incluent :

- **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.

2.1.8 Formule de Little

La formule de Little[22] représente 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).

Soit un système d'attente où le taux d'arrivée effectif des clients est λ , L_s le temps moyen de séjour dans le système, et W_s le nombre moyen de clients dans le système. Lorsque ces valeurs existent, la formule de Little s'écrit :

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

De même, 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 devient :

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

2.1.9 Systèmes de files d'attente avec rappels

Les systèmes de files d'attente intégrant des mécanismes de rappels sont largement utilisés dans divers domaines tels que les réseaux téléphoniques, les infrastructures informatiques et les systèmes de télécommunication. Leur fonctionnement repose sur le principe que lorsqu'un client tente d'accéder au service mais trouve tous les serveurs occupés, il ne disparaît pas du système, mais revient ultérieurement après un délai aléatoire pour essayer de nouveau.

L'introduction de ce comportement de rappels successifs a profondément modifié l'approche analytique des files d'attente. En effet, les modèles classiques ne suffisent plus à représenter fidèlement ces dynamiques, rendant les résultats standards souvent inadaptés. Avant que ces nouveaux modèles ne soient introduits, les systèmes étaient souvent représentés à l'aide de modèles à pertes, qui ignoraient totalement la possibilité de rappels, ce qui limitait considérablement

leur réalisme. Les files d'attente avec rappels ont démontré leur utilité dans la modélisation de nombreux systèmes complexes. Un exemple notable est celui des procédures d'atterrissage dans les aéroports : lorsqu'un avion ne peut pas atterrir immédiatement, il patiente avant de faire une nouvelle tentative, un comportement analogue à celui d'un client en orbite dans une file d'attente avec rappels. Dans ces systèmes, lorsqu'un client arrive et que le serveur est disponible, il est pris en charge sans délai et quitte le système une fois le service terminé. En revanche, si le serveur est déjà occupé, le client est dirigé vers une file d'attente secondaire, appelée (orbite), d'où il effectuera de nouvelles tentatives de connexion selon une stratégie de rappels déterminée à l'avance. 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 [23][24] et les références qu'ils contiennent).

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

Pour caractériser les systèmes avec rappels, on utilise la notation de Kendall

$$A/B/s/N/O/H$$

où :

- A : distribution du temps inter-arrivées
- B : distribution du temps de service
- s : nombre de serveurs identiques et indépendants
- N : capacité de la file d'attente (nombre maximal de clients en attente)
- O : capacité de l'orbite (nombre maximal de clients pouvant être renvoyés dans l'orbite)
- $H = \{H_k, k \geq 0\}$: fonction de persistance (probabilité qu'un client dans l'orbite tente un rappel)

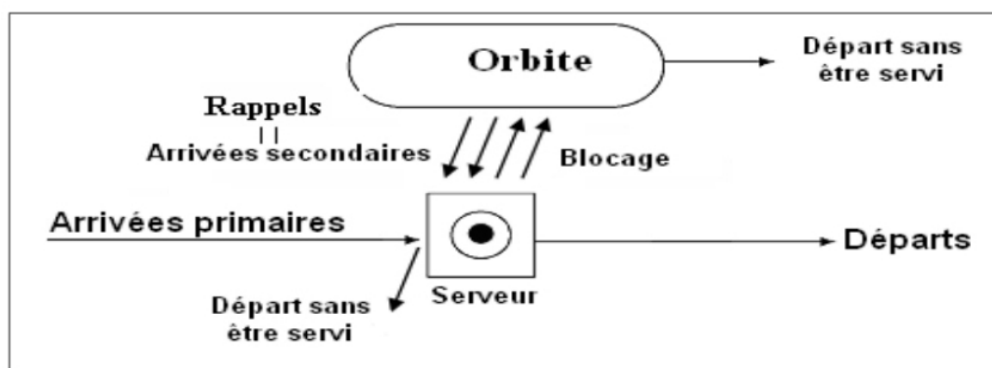


FIGURE 2.3 – Schéma général d'un système de files d'attente avec rappels.

Remarques :

- Si N , O ou H sont absents dans la notation, alors par convention :

$$N = s, \quad O = \infty, \quad H_k = 1 \quad \text{pour tout } k \geq 0.$$

- La distribution du temps de **rappel** (inter-rappels) n'est pas indiquée dans cette notation.

2.1.11 Politiques de rappels

La modélisation des files d'attente avec rappels requiert une définition rigoureuse du mécanisme de rappels, celui-ci devant être choisi de manière à garantir une représentation fidèle du système réel à analyser. Dans ce cadre, Artalejo [25] propose une classification des principales politiques de rappels rencontrées dans la littérature, à savoir : la politique de rappels classiques, la politique de rappels à taux constant, ainsi que la politique de rappels linéaires, chacune correspondant à des dynamiques spécifiques observées dans divers contextes applicatifs.

2.1.12 Modèle M/M/1 avec rappels classiques

Soit un système de files d'attente sans positions d'attente. Le service est assuré par un seul serveur. Les clients primaires arrivent selon un processus de Poisson de taux $\lambda > 0$. Lorsqu'un client arrive dans le système et trouve le serveur libre, il est immédiatement pris en charge. Une fois son service terminé, il quitte le système. En revanche, si le serveur est occupé à son arrivée, le client est dirigé vers une orbite, depuis laquelle il tentera ultérieurement de rappeler jusqu'à ce que le serveur devienne disponible.

Les temps de service suivent une loi exponentielle de paramètre μ . On suppose que les temps entre les arrivées des clients primaires, les temps de rappel et les temps de service sont mutuellement indépendants. On note par $C(t)$ l'état du serveur à l'instant t , où :

$$C(t) = \begin{cases} 0, & \text{si le serveur est libre,} \\ 1, & \text{si le serveur est occupé.} \end{cases}$$

Par ailleurs, $N(t)$ désigne le nombre de clients présents dans l'orbite à l'instant t .

En supposant que le régime stationnaire existe, ce qui est garanti lorsque $\rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1$, le processus

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

forme une chaîne de Markov bidimensionnelle, dont l'espace d'état est donné par $\{0, 1\} \times \mathbb{N}$.

2.2 Théorie des jeux

2.2.1 Historique

En 1654, Antoine GOMBAULD, posa une énigme à Blaise PASCAL «comment répartir entre deux joueurs l'enjeu d'un jeu de hasard, lorsque celui-ci est inachevé et qu'un des joueurs a l'avantage sur l'autre.»

Plusieurs siècles plus tard, en 1912, le mathématicien E. ZERMELO fit une avancée majeure en prouvant le premier théorème mathématique de la théorie des jeux, connu sous le nom de "décidabilité du jeu d'échecs". Ce théorème introduisit la notion fondamentale de "jeu à deux joueurs de somme nulle", dans les années 1920, plus précisément entre 1921 et 1927, Emile BOREL apporta sa propre contribution importante à la théorie des jeux : application du concept de jeu aux sciences sociales et en donne une approche mathématique. En 1928, Von NEUMANN avec le théorème de minimax « tout jeu à somme nulle et deux joueurs qui ont fait leurs choix dans des ensembles finis des stratégies pures, comporte au moins un équilibre en stratégies mixtes ».

2.2.2 Définition

La théorie des jeux, c'est la théorie de la décision[6]. Créée officiellement par John Von Neumann, est un outil puissant pour analyser les comportements humains, qui a pris une grande importance depuis la publication de l'ouvrage de Morgenstern et Neumann intitulé « The Theory of Games and Economic Behavior », ou « Théorie des jeux et comportement économique » en 1944.

Et elle peut être présente aussi comme une approche mathématique reposant sur des modèles et des techniques destinées à étudier les choix des individus rationnels. En général, les jeux sont divisés en deux catégories : les jeux coopératifs, où les participants peuvent travailler ensemble, et les jeux compétitifs, où chaque joueur cherche à maximiser ses propres gains.

2.2.3 Généralités

Nous allons présenter ci-dessous quelques définitions essentielles pour la compréhension de la théorie des jeux.

• Conflit (jeu)

Un conflit est une situation où les questions suivantes ont un sens

1. Qui participe à cette situation ?
2. Quel sont les résultat possibles de cette situation ?
3. Qui est intéressé par ces résultat ? comment ?.[7]

• Joueur

Toute personne qui participe au conflit (jeu), capable de prendre des décisions et d'agir pour son propre intérêt selon le principe de la rationalité individuelle.[11]

- **Gain**

Le gain d'un joueur correspond au bénéfice qu'il reçoit en fonction des décisions prises par tous les participants du jeu.

- **Interaction**

Les choix de chaque joueur ont un impact sur ceux des autres, ce qui crée une relation d'influence mutuelle entre les décisions.

- **Rationalité individuelle**

Un joueur agit de manière rationnelle lorsqu'il sélectionne la stratégie qui lui apporte le plus grand avantage, en prenant en compte les choix des autres joueurs.[7]

2.2.4 Classification des jeux

Les jeux peuvent être typés selon quelques critères comme le comportement, l'information du jeu et la décision à prendre.[11]

Jeux coopératifs / compétitifs

Les jeux sont classés en fonction du comportement des joueurs envers les autres, soit en coopération, soit en compétition.

Jeux coopératifs

Un jeu coopératif est un jeu dans lequel les joueurs ont la possibilité de se concerter et de s'engager à coopérer avant de définir la stratégie à adopter. Si ces conditions ne sont pas vérifiées et si les joueurs ne peuvent pas communiquer entre eux, le jeu est dit **Jeu non-coopératif**[7]

Jeux compétitifs

Par définition, dans un jeu compétitif nous spécifions toutes les options stratégiques offertes aux joueurs, alors que les contrats qui sous-tendent les coalitions dans un jeu coopératif ne sont pas décrits. Chaque joueur cherche à avoir ses biens sans tenir compte aux autres joueurs.

Jeux avec décisions simultanées / séquentielles

Les jeux sont classés en fonction de l'ordre dans lequel les joueurs prennent leurs décisions, soit de manière simultanée, soit de manière séquentielle.

Jeux avec décision simultané

Dans les jeux simultanés, les joueurs prennent leurs décisions sans connaître celles prises par les autres joueurs ou les joueurs prennent leurs décisions en même temps[8] (exemple : le dilemme du prisonnier, le jeu pierre-feuille-ciseaux et le jeu du duopole de Cournot).

Jeux avec décision séquentielle

Ici, les joueurs prennent leurs tours les uns après les autres, et chaque joueur connaît les actions précédentes de son adversaire avant de faire son propre choix. En d'autres termes, chaque joueur a connaissance de l'historique du jeu et de ce que l'autre joueur a fait avant de prendre sa décision (exemple : Le jeu d'échecs ou le jeu de go).

Jeux à information parfaite / imparfaite

Dans ce typage les jeux sont typés selon l'information sur les autres joueurs, autrement dit c'est ce que le joueur connaissent au moment où il prend sa décision.

On parle d'information parfaite lorsqu'un jeu possède un mécanisme séquentiel, permettant à chaque joueur de connaître à tout instant toutes les actions effectuées avant son choix. Si le joueur n'a pas connaissance des actions faites avant son choix ou s'il souffre d'amnésie, alors on parle d'un jeu à information imparfaite .

Jeux à information complète / incomplète

Ce typage se base sur l'information des joueurs par rapport aux autres joueurs.

Le jeu est à information complète, si chaque joueur connaît la structure du jeu, c'est-à-dire l'ensemble des joueurs, les ensembles des stratégies de tous les joueurs, ainsi que leurs fonctions de gain. Chaque joueur sait également que tous les autres joueurs disposent de ces informations, on parle alors de connaissance commune. Le jeu est à information incomplète, s'il existe une incertitude sur l'un des éléments cités précédemment

2.2.5 Présentation d'un jeu sous forme extensive et normale

Forme normale

Un jeu sous forme normale est donné par le triplet :

$$\langle I, \{X_i\}_{i \in I}, \{f_i\}_{i \in I} \rangle$$

avec les éléments suivants :

- $I = \{1, 2, \dots, n\}$ est l'ensemble des joueurs.
- X_i est l'ensemble des stratégies du joueur i . L'issue x du jeu correspond au vecteur

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n),$$

où $x_i \in X_i$ est la stratégie jouée par le joueur i .

- Les gains (utilités) pour les joueurs sur l'ensemble des issues $X = \prod_{i=1}^n X_i$ sont représentés par une fonction $f_i : X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow \mathbb{R}$, qui donne le gain du joueur i en fonction de l'issue $x \in X$ [11].

Forme extensive

Dans cette forme le jeu est représenté sous forme d'un arbre appelé l'arbre de Kuhn, ou les joueurs sont représentés par les nœuds de l'arbre, les décisions de joueurs sont les arcs descendus du nœud qui présente le joueur, la racine de l'arbre représente le joueurs qui initialise le jeu (le premier joueur qui commence), les feuilles de l'arbre représente le gain de chaque joueur représentés sous format de vecteur qui a comme dimension le nombre des joueurs participants dans le jeu.

Exemple : Jeu d'entrée sur un marché

Nous considérons une entreprise, notée NV (Nouveau Venu), qui envisage de produire un bien dont l'offre est le fait d'une autre entreprise M (pour Monopole).

Pour l'entreprise M, elle a deux choix : soit elle cède en limitant sa production afin d'éviter un affrontement des prix dans le cas où l'entreprise NV entre, soit elle ne cède pas en maintenant la même offre. Nous avons les situations possibles suivantes :

- **NV n'entre pas et M ne cède pas** : Dans ce cas, l'entreprise NV n'en tire aucun profit ($u_{NV} = 0$), par contre l'entreprise M en tire le profit maximal ($u_M = 10$).
- **NV entre et M cède** : Dans ce cas, il y a un partage des ventes et des bénéfices qu'on peut supposer égaux : $u_{NV} = u_M = 4$.
- **NV entre et M ne cède pas** : Dans ce cas, les deux entreprises produisent à perte et on peut supposer : $u_{NV} = -3$ et $u_M = -2$.
- **NV n'entre pas et M cède** : Alors $u_{NV} = 0$ et $u_M = 10$.

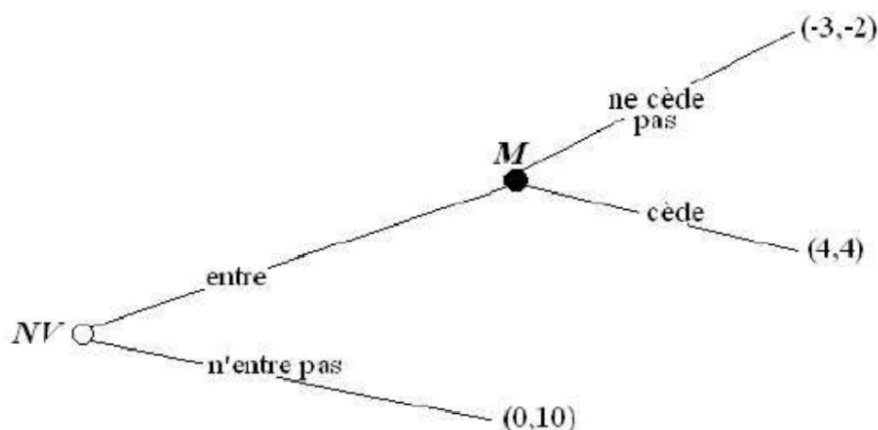


FIGURE 2.4 – Forme extensive du jeu d'entrée sur un marché.

Stratégie

Une stratégie désigne une action ou un ensemble d'instructions visant à atteindre un objectif spécifique. Le résultat des choix de tous les joueurs donne lieu à une issue ou un profil d'actions du jeu.

- Une **stratégie pure** du joueur i est une action, ou un ensemble d'actions, choisie avec certitude.
- Une **stratégie mixte** En théorie des jeux, une stratégie est dite *mixte* lorsqu'un joueur choisit au hasard son action parmi celles disponibles. Cela revient à associer une distribution de probabilité sur l'ensemble des stratégies pures du jeu. Une stratégie mixte est représentée par un vecteur

$$\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_{n_i}) \in \Delta_i,$$

où

$$\Delta_i = \left\{ \alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_{n_i}) \in \mathbb{R}^{n_i} : 0 \leq \alpha_j \leq 1, \forall j \in \{1, \dots, n_i\}, \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_j = 1 \right\},$$

dans lequel α_i représente la probabilité que le joueur choisisse sa i -ème stratégie pure, n_i étant le nombre de stratégies pures disponibles pour le joueur. L'ensemble Δ_i désigne l'ensemble des stratégies mixtes du joueur i .

L'équilibre de Nash

L'équilibre de Nash doit son nom au mathématicien et économiste américain John F. Nash, qui a introduit ce concept en 1950 dans sa thèse de doctorat. Cette notion d'équilibre désigne une situation où chacun des joueurs maximise ses gains. Il décrit ainsi une issue dans laquelle aucun joueur ne souhaite modifier sa stratégie étant donnée les stratégies de ses adversaires.

Définition VI.4.1 Une situation $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*) \in X$ est un équilibre de Nash en stratégies pures du jeu (II.1), si pour chaque joueur :

$$f_i(x_i^*, x_{-i}^*) \geq f_i(x_i, x_{-i}^*) \quad \forall x_i \in X_i, \forall i \in I.$$

Conclusion

Les concepts développés dans ce chapitre constituent une base théorique solide pour l'analyse des systèmes radio cognitifs. Tandis que les files d'attente permettent de quantifier les performances en termes de délais et de charge, la théorie des jeux éclaire les mécanismes de décision dans des environnements partagés. La combinaison de ces deux approches sera essentielle pour la suite de notre étude.

3

État de l'art

Introduction

Ce chapitre est consacré à une revue structurée des recherches existantes autour de la modélisation des réseaux radio cognitive. Nous explorons comment les outils mathématiques présentés précédemment, notamment les chaînes de Markov, les files d'attente et la théorie des jeux, ont été mobilisés pour améliorer l'accès au spectre et la performance globale des réseaux cognitifs.

3.1 Application de la théorie des jeux aux réseaux sans fil cognitifs : modélisation et optimisation des interactions

Dans leur étude [14], Saurabh Mehta et K.S. Kwak soulignent que la théorie des jeux constitue un outil pertinent pour modéliser les comportements de décideurs autonomes dont les choix ont des impacts réciproques. Cette approche trouve une application naturelle dans le domaine des technologies de l'information, et plus particulièrement dans les réseaux sans fil. En radio cognitive, les interactions complexes entre utilisateurs peuvent être efficacement représentées sous forme de jeux, à différents niveaux de la pile protocolaire. Cela offre non seulement un cadre d'analyse des protocoles existants, mais aussi un moyen de concevoir de nouveaux mécanismes incitatifs visant à promouvoir des comportements collectivement optimaux. L'objectif de cette démarche est double : modéliser les problématiques fondamentales associées aux réseaux de radio cognitive, et approfondir la compréhension des interactions entre diverses catégories de réseaux sans fil.

3.2 Gestion du Spectre et Protocoles de Routage dans les Réseaux Radio Cognitive : Approches Intelligentes et Adaptatives

Dans la thèse de Benidris Fatima Zohra [15], la gestion du spectre dans les réseaux radio cognitive (RRC) a pour objectif d'optimiser l'utilisation des ressources radio tout en minimisant les interférences avec les utilisateurs primaires. Ce processus repose sur plusieurs fonctions clés, notamment la détection, la décision, l'accès et la mobilité du spectre. Afin d'améliorer l'efficacité de cette gestion, des approches intelligentes intégrant des systèmes multi-agents et l'apprentissage automatique ont été proposées. Le clustering, qui consiste à organiser les utilisateurs en groupes dirigés par des Cluster-Heads, est ainsi devenu une solution prometteuse pour faciliter la gestion locale du spectre. De plus, le routage dans les RCN se confronte à des défis spécifiques liés à la dynamique du spectre, ce qui nécessite des protocoles adaptatifs, réactifs ou proactifs utilisant les informations collectées par les Cluster-Heads. Enfin, des recherches récentes ont exploré l'application de l'apprentissage par renforcement pour améliorer la prise de décision et optimiser les performances des protocoles de gestion du spectre et de routage.

3.3 Apport des Réseaux Radio Cognitifs et de la Théorie des Jeux dans l'Optimisation de l'Accès au Spectre

Selon M. Benhamida et B. Benyahia [1], les réseaux radio cognitifs constituent une approche innovante pour améliorer l'efficacité d'utilisation du spectre radioélectrique, en substituant à l'allocation statique traditionnelle une gestion opportuniste des ressources. Grâce à des techniques intelligentes, cette technologie permet aux utilisateurs secondaires de détecter et d'exploiter de manière dynamique les bandes de fréquence momentanément inoccupées, sans provoquer d'interférences avec les utilisateurs primaires.

Les auteurs soulignent également l'intérêt de la théorie des jeux pour modéliser les comportements stratégiques dans ce type de réseau. Cette approche permet de représenter les interactions entre utilisateurs concurrents, chacun visant à optimiser son accès au spectre tout en respectant les contraintes de coexistence. Les modèles de jeux développés dans ce cadre s'avèrent particulièrement adaptés à la conception de mécanismes d'accès dynamiques, équilibrés et efficaces pour les réseaux radio cognitifs.

3.4 Stratégies décisionnelles des utilisateurs secondaires dans les réseaux radio cognitive : Théorie des jeux et optimisation sociale

Selon Zheng Chang [16], dans les réseaux radio cognitive, les utilisateurs secondaires ont la possibilité d'accéder au spectre lorsque les utilisateurs primaires sont absents. Dans ce cas, les SUs peuvent rejoindre une file d'attente pour être servis par la station de base, mais cette file d'attente est annulée dès qu'un PU réapparaît, afin de garantir sa priorité. Pour modéliser les décisions des SUs face à cette incertitude, l'étude s'appuie sur la théorie des jeux de file d'attente. Elle examine le processus décisionnel des SUs, en particulier leur choix stratégique

de rejoindre ou non la file d'attente, en fonction des conditions du système. Deux types de stratégies sont analysés : l'équilibre individuel, où chaque SU cherche à maximiser son propre bénéfice, et l'optimisation sociale, qui cherche à maximiser le bien-être collectif. En outre, l'étude explore la tarification optimale que pourrait adopter le fournisseur de services pour aligner les intérêts individuels avec l'optimum social. L'efficacité des modèles proposés est validée par des simulations numériques, qui confirment la pertinence des stratégies étudiées.

3.5 Gestion du spectre dans les réseaux radio cognitifs : de la perte de paquets au stockage en buffer

Le travail présenté dans [16] explore un modèle de jeu de file d'attente appliqué aux réseaux radio cognitifs, où les SUs choisissent d'entrer ou non dans une file d'attente, en considérant que l'arrivée d'un PU entraîne la perte immédiate de leurs paquets.

Dans [17], Khider Numidia et Boumaiza Rofia proposent une amélioration de ce modèle en adoptant une hypothèse plus réaliste : les paquets des SUs ne sont plus perdus, mais temporairement stockés dans un buffer situé au niveau de la station de base. À partir de cette nouvelle modélisation, deux types de jeux de file d'attente ont été élaborés : le premier optimisant l'intérêt individuel des SUs, et le second visant à atteindre un équilibre social. Des simulations numériques ont été réalisées afin de comparer les performances de ces deux approches. Pour mieux refléter les conditions réelles, les auteurs ont également pris en compte la possibilité de perte de clients et ont calculé les probabilités stationnaires du système dans différents scénarios.

3.6 Vers une architecture multi-agents pour la radio cognitive opportuniste

Dans le cadre de ses recherches, Amraoui Asma[18] a étudié l'utilisation des systèmes multi-agents (SMA) pour la gestion du spectre dans les réseaux radio cognitive. Cette approche se révèle particulièrement adaptée aux environnements dynamiques et distribués, en raison de la capacité des agents à prendre des décisions de manière autonome et coordonnée. Il a proposé une architecture innovante structurée en trois niveaux : le niveau physique, qui assure la détection et la collecte des informations de l'environnement radio ; le niveau cognitif, chargé de l'analyse et de la prise de décision ; et enfin, le niveau comportemental, qui gère les interactions et la coopération entre agents. Pour valider cette architecture, plusieurs techniques ont été combinées, notamment la théorie des enchères, les méthodes multicritères d'aide à la décision, la formation de coalitions et l'intelligence distribuée, dans le but d'optimiser l'utilisation du spectre radio disponible.

3.7 Optimisation de l'accès au spectre dans les réseaux radio cognitifs : Modélisation par la théorie des jeux et dynamique d'apprentissage adaptatif

Selon Niyato et Hossain [19], la radio cognitive améliore l'efficacité du spectre en permettant un accès dynamique aux fréquences sous-utilisées, sans interférer avec les utilisateurs primaires. Le partage du spectre est modélisé par la théorie des jeux non coopératifs, où chaque utilisateur secondaire agit de manière rationnelle pour maximiser son utilité, conduisant à un équilibre de Nash. Cependant, l'information parfaite sur les stratégies des autres joueurs est souvent irréaliste. Pour y remédier, des approches de rationalité limitée sont proposées, où les utilisateurs ajustent leurs stratégies via des algorithmes d'apprentissage adaptatif. Ces dynamiques sont analysées pour garantir la stabilité et la convergence vers un équilibre stable, même sans coordination explicite.

3.8 Approches Coopératives de Détection de Brouillage en Régime Large-Bande : Vers une Intelligence Distribuée des Radios Cognitives

Les Auteurs [20] examinent la vulnérabilité des communications sans fil face aux attaques de brouillage, en particulier dans un contexte large-bande. Il propose un schéma coopératif centralisé combinant l'échantillonnage compressif et des techniques intelligentes de détection d'anomalies pour identifier rapidement et efficacement la présence de bruit blanc gaussien additif (BBGA) et de signaux de brouillage malveillants. Chaque utilisateur de radio cognitive capture localement des signaux compressés via un convertisseur analogique-information et un démodulateur aléatoire, réduisant ainsi le volume d'échantillons nécessaires. Les mesures compressées sont ensuite centralisées sous forme de matrice d'observations et analysées à l'aide de méthodes statistiques, de clustering et de classification pour détecter les anomalies. Cette approche permet une détection robuste, rapide et peu complexe des effets de brouillage dans le spectre, grâce à la coopération entre les utilisateurs radio.

3.9 Partage du spectre dans les réseaux de capteurs sans fil cognitifs : Jeu de Bertrand et optimisation par colonies de fourmis

Selon Yuxing Mao, Tao Cheng, Huiyuan Zhao et Na Shen [21], l'essor des réseaux de capteurs sans fil a rendu essentiel l'utilisation de la radio cognitive pour exploiter le spectre inutilisé des utilisateurs primaires, afin d'améliorer la qualité de service. Dans ce cadre, une stratégie de partage du spectre a été proposée pour les réseaux de capteurs sans fil organisés en grappes, où la station de base, en tant qu'utilisateur secondaire, négocie l'accès au spectre pour les grappes via un jeu de Bertrand avec les utilisateurs primaires, considérés comme des monopoleurs. Après avoir acquis le spectre, la station de base l'alloue aux chefs de grappes en formulant le

problème sous forme de sac à dos multiple, résolu par un algorithme d'optimisation inspiré des colonies de fourmis. Enfin, chaque chef de grappe planifie l'utilisation du spectre pour ses nœuds en fonction d'une séquence temporelle. Les simulations montrent que le jeu de Bertrand est efficace pour la fixation des prix du spectre et que l'algorithme d'optimisation permet une allocation dynamique et efficace des ressources spectrales.

3.10 Modélisation de l'accès opportuniste au spectre dans les réseaux radio cognitive : approches par files d'attente et théorie des jeux

Dans La radio cognitive constitue une solution efficace pour améliorer l'utilisation du spectre sans fil, en permettant aux utilisateurs secondaires d'exploiter dynamiquement les canaux temporairement inoccupés par les utilisateurs primaires. Dans le mémoire de S. Tacherafet [4] s'est intéressée à la modélisation du comportement des SUs, qui accèdent de manière opportuniste au spectre libre via un mécanisme d'accès aléatoire. Pour cela, elle a proposé deux modèles de files d'attente de type M/M/1 avec rappels, représentant un système de radio cognitive où les SU sont en concurrence pour accéder aux canaux disponibles. Elle a analysé ces modèles à l'aide de la méthode des fonctions génératrices, ce qui lui a permis d'obtenir les distributions conjointes de l'état du serveur et de la longueur de l'orbite à l'état stationnaire. Cette approche lui a permis de calculer plusieurs indicateurs de performance du système, comme le temps d'attente moyen ou la probabilité de blocage, contribuant ainsi à une meilleure compréhension du fonctionnement des réseaux cognitifs.

Conclusion

Les travaux recensés dans ce chapitre montrent la richesse des approches adoptées pour modéliser les comportements dans les réseaux radio cognitive. Ils mettent en évidence la pertinence des outils analytiques comme la théorie des jeux et les files d'attente pour résoudre des problématiques complexes d'accès au spectre. Ces perspectives guideront notre propre démarche de modélisation dans le chapitre suivant.

4

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

Introduction

Ce chapitre présente notre contribution principale : un modèle mathématique combinant un système de files d'attente de type M/M/1 avec rappels et pertes de clients, appliqué à un réseau radio cognitive. L'objectif est d'évaluer les performances de ce système en intégrant les comportements dynamiques des utilisateurs secondaires et les contraintes liées à l'accès au spectre.

4.1 File d'attente

4.1.1 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 . A l'arrivée du paquet secondaire, si le medium est libre, ce paquet accède au medium avec une probabilité p ou rejoint l'orbite avec une probabilité $(1-p)$. Le service est exponentiel de paramètre μ . Les intervalles de temps inter-rappels suivent une distribution exponentielle de taux $j\theta$ (j correspond à le nombre clients dans l'orbite). Les paquet primaire arrivent selon un processus de Poisson de taux ϵ . Si un paquet primaire arrive, il accède directement au serveur, entrant 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 independants, suivent une distribution exponentielle de moyenne $1/\mu$ et les processus stochastiques impliqués dans le système sont mutuellement independants. Ce modèle est décrit par la chaîne de Markov bidimensionnelle

$(C(t), X(t))$, où :

$$C(t) = \begin{cases} 0 & \text{si le medium est libre à l'instant } t. \\ 1 & \text{si le medium est occupé par le serveur d'un paquet SU à l'instant } t. \\ 2 & \text{si le medium est occupé par le serveur d'un paquet PU à l'instant } t. \end{cases}$$

Soit $X(t) = j$, où j représente le nombre de 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 défini par :

$$S = \{(0, j), (1, j), (2, 0) \mid j = 0, 1, 2, \dots\}$$

4.1.2 Calcul de la distribution stationnaire

Soit

$$P_j = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbb{P}(C(t) = 0, X(t) = j), \quad Q_j = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbb{P}(C(t) = 1, X(t) = j), \quad R_j = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbb{P}(C(t) = 2, X(t) = 0),$$

Elles représentent les distributions conjointes de l'état du serveur et de la longueur de la file en orbite à l'état stationnaire.

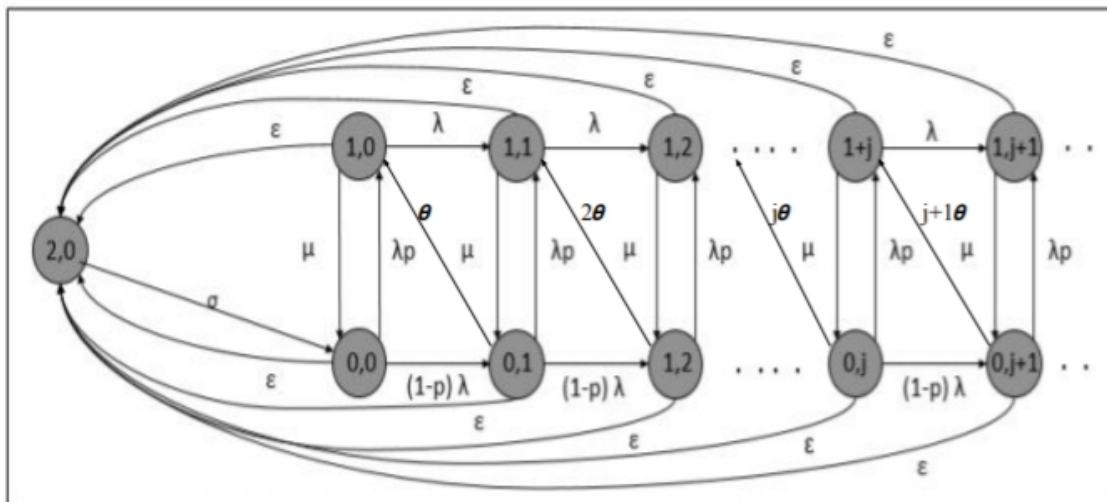


FIGURE 4.1 – Diagramme de transition.

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

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

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

$$(\lambda + \varepsilon + \mu)Q_0 = \lambda p P_0 + \theta P_1 \quad (4.3)$$

$$(\lambda + \varepsilon + \mu)Q_j = \lambda p P_j + (j + 1)\theta P_{j+1} + \lambda Q_{j-1} \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (4.4)$$

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

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

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

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

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

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

$R < 1$, alors le système est stable.

La probabilité que le serveur est occupé est :

$$Q(1) = \left(\frac{\lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu} \right) \cdot \left(\frac{\sigma}{(\lambda + \varepsilon) - (1 - p)\lambda - \theta - \mu \cdot \left(\frac{\lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu} \right)} \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) \quad (4.9)$$

La probabilité que le serveur est libre est :

$$P(1) = \left(\frac{\sigma}{(\lambda + \varepsilon) - (1 - p)\lambda - \theta - \mu \cdot \left(\frac{\lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu} \right)} \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) \quad (4.10)$$

4.1.3 Caractéristiques du système

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

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

$$L_s = \left(\frac{\sigma \varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) \cdot \left(\frac{(1-p)\lambda}{(\lambda + \varepsilon) - (1-p)\lambda - \theta - \mu \cdot \left(\frac{\lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu} \right)} \right) + \left(\frac{\lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu} \right) \cdot \left(\frac{1}{(\lambda + \varepsilon) - (1-p)\lambda - \theta - \mu \cdot \left(\frac{\lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu} \right)} \right) \quad (4.12)$$

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[22] :

$$W_s = \lambda \times L_s \quad \text{et} \quad W_q = \lambda \times L_q$$

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

$$W_s = \lambda \cdot \left(\frac{\sigma \varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) \cdot \left(\frac{(1-p)\lambda}{(\lambda + \varepsilon) - (1-p)\lambda - \theta - \mu \cdot \left(\frac{\lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu} \right)} \right) + \left(\frac{\lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu} \right) \cdot \left(\frac{1}{(\lambda + \varepsilon) - (1-p)\lambda - \theta - \mu \cdot \left(\frac{\lambda p}{\lambda + \varepsilon + \mu} \right)} \right) \quad (4.14)$$

4.1.4 Illustrations numériques

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

La Figure 4.2 illustre l'impact du taux d'arrivée des paquets primaires ϵ sur le nombre moyen de clients secondaires en orbite L_q . Pour cette analyse, nous avons utilisé les paramètres suivants : $\mu = 1$, $\sigma = 1$, $\theta = 0.3$, $p = 0.5$. Trois valeurs du taux d'arrivée des utilisateurs secondaires λ ont été considérées : λ ($\lambda = 0.3$, $\lambda = 0.6$ et $\lambda = 0.9$). Le graphique montre que pour chaque valeur de λ , L_q diminue à mesure que ϵ augmente. Cela s'explique par le fait qu'une arrivée plus fréquente des utilisateurs primaires interrompt davantage l'accès au canal. En conséquence, les clients secondaires sont plus souvent retirés de l'orbite.

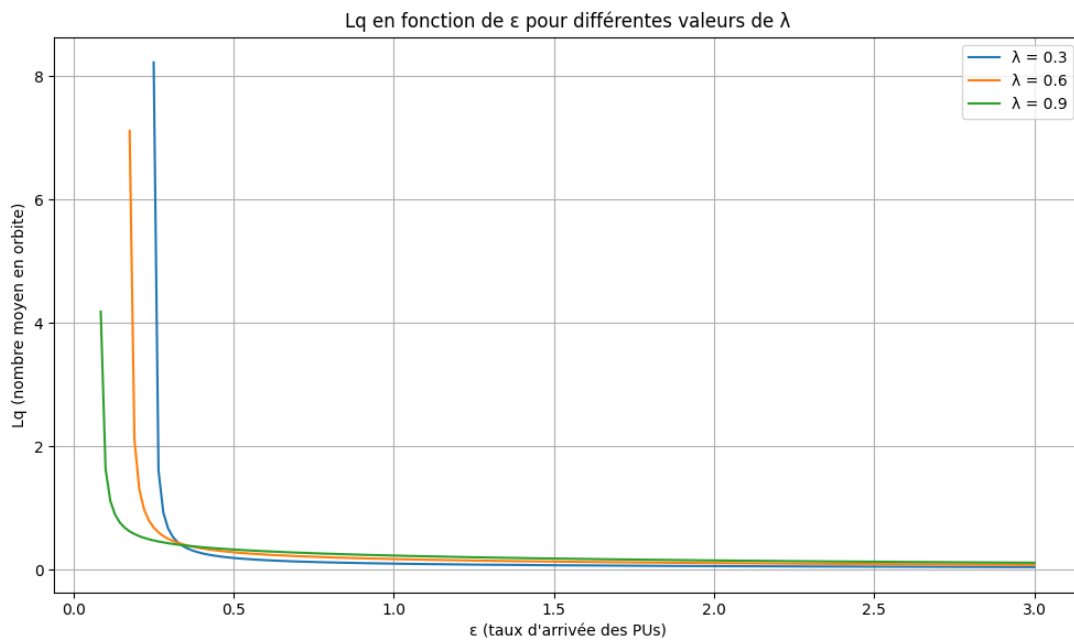


FIGURE 4.2 – L_q en fonction de ϵ pour différentes valeurs de λ .

La Figure 4.3 met en évidence l'effet du taux de service μ sur le nombre moyen de clients secondaires en orbite L_q , en présence d'un trafic primaire. Pour cette étude, les paramètres suivants ont été utilisés : $\epsilon = 0.5$, $\sigma = 1$, $\theta = 0.3$, $p = 0.5$. Trois valeurs du taux d'arrivée des utilisateurs secondaires λ ont été considérées : λ ($\lambda = 0.3$, $\lambda = 0.6$ et $\lambda = 0.9$). Le graphique montre que L_q diminue de manière significative à mesure que μ augmente. Ce résultat est intuitif : un serveur plus rapide traite les demandes plus efficacement, ce qui réduit la congestion dans l'orbite.

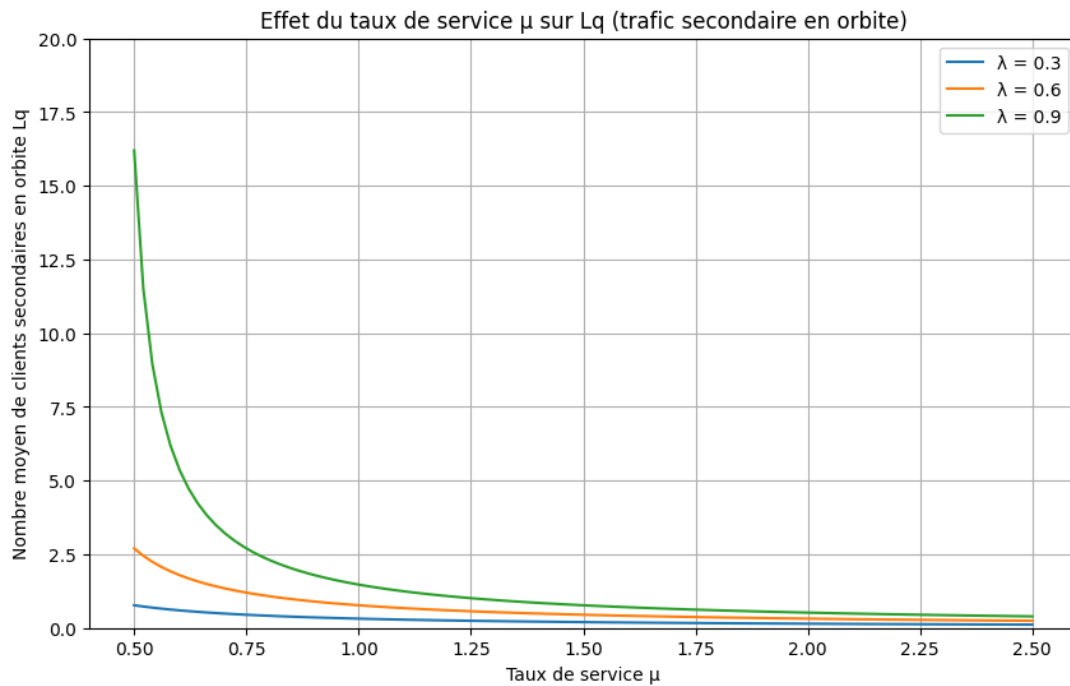


FIGURE 4.3 – L_q en fonction de μ pour différentes valeurs de λ .

La Figure 4.4 illustre l'impact du taux de rappel θ sur le nombre moyen de clients secondaires en orbite L_q , dans un contexte où un trafic primaire est présent. Les paramètres utilisés pour cette analyse sont : $\epsilon = 0.5$, $\sigma = 1$, $\mu = 1$, $p = 0.5$. Trois valeurs du taux d'arrivée des utilisateurs secondaires λ ont été considérées : λ ($\lambda = 0.3$, $\lambda = 0.6$ et $\lambda = 0.9$). Le graphique montre que L_q diminue car les clients passent moins de temps en orbite, à mesure que θ augmente. Cela s'explique par le fait qu'un taux de rappel plus élevé permet aux clients secondaires de tenter plus fréquemment d'accéder au canal, augmentant ainsi leurs chances d'être servis et réduisant la congestion de l'orbite. Toutefois, lorsque le taux d'arrivée λ est élevé, la diminution de L_q devient moins marquée.

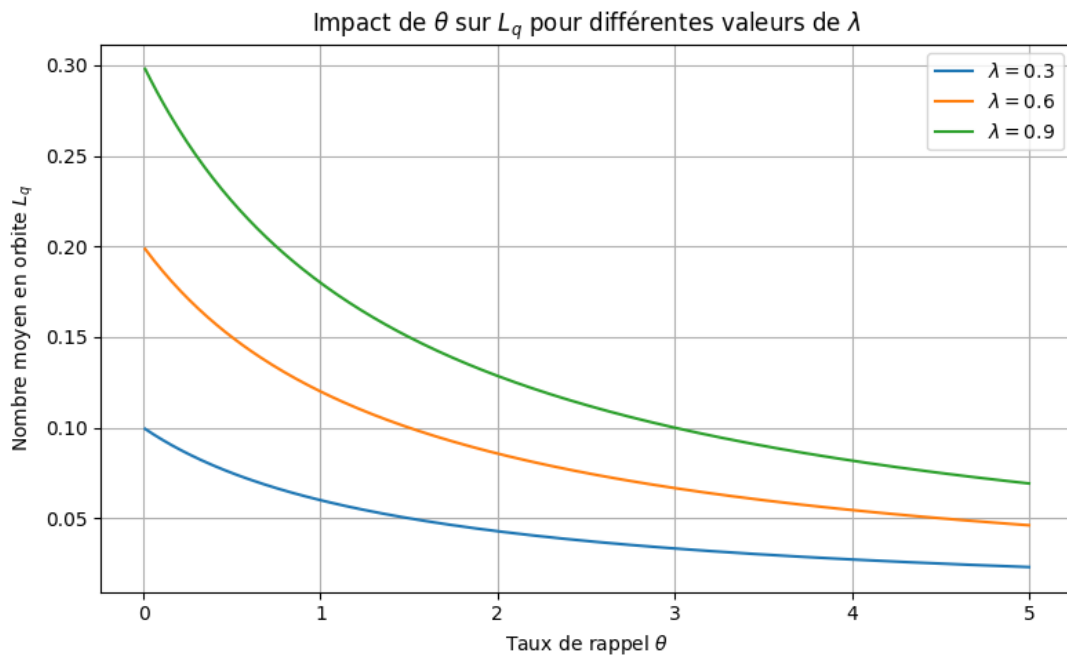


FIGURE 4.4 – L_q en fonction de θ pour différentes valeurs de λ .

La Figure 4.5 illustre l'impact de la probabilité d'accès direct p sur le nombre moyen de clients secondaires en orbite L_q , en fonction du taux d'arrivée λ des utilisateurs secondaires, dans un contexte marqué par la présence d'un trafic primaire. Les paramètres retenus pour cette analyse sont : $\epsilon = 1.5$, $\sigma = 2.5$, $\mu = 3$, $\theta = 0.5$. Trois valeurs de la probabilité d'accès direct ont été considérées : ($p = 0.1$, $p = 0.5$ et $p = 0.9$). Le graphique met en évidence que lorsque la probabilité d'accès direct p est faible (par exemple $p = 0.1$, L_q augmente rapidement avec λ . Cela signifie que peu d'utilisateurs secondaires parviennent à accéder au canal dès leur première tentative et sont donc redirigés vers l'orbite. En revanche, lorsque p est élevé (par exemple $p = 0.9$), un plus grand nombre d'utilisateurs accèdent directement au service, ce qui réduit considérablement la charge de l'orbite.

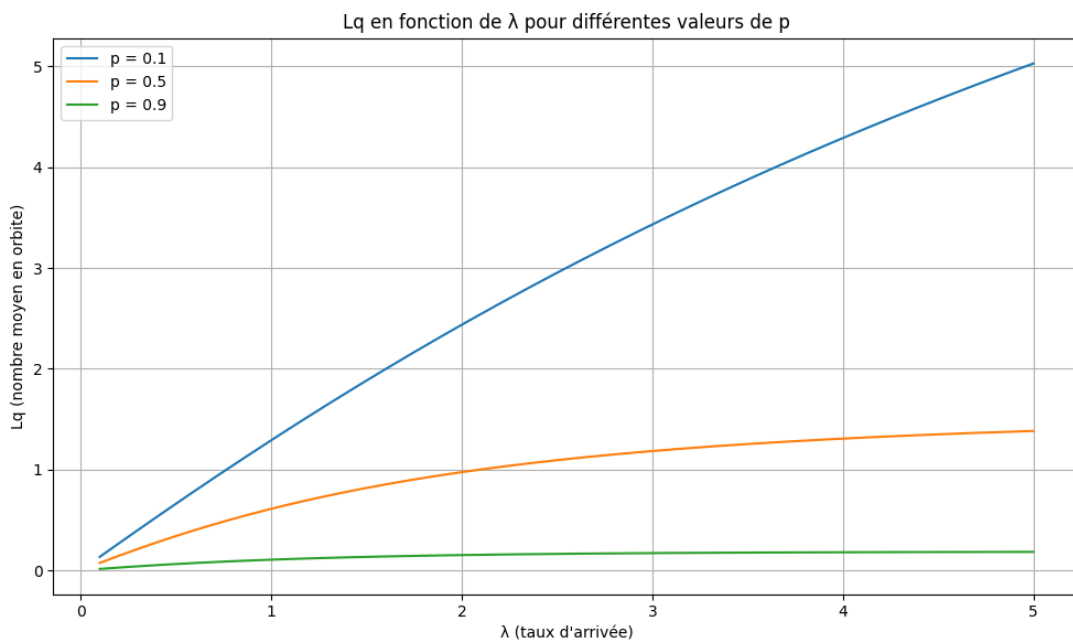


FIGURE 4.5 – L_q en fonction du taux d'arrivée λ .

La Figure 4.6 montre l'effet de la probabilité d'accès direct p sur le temps moyen d'attente en orbite W_q , en fonction du taux d'arrivée λ des utilisateurs secondaires, dans un environnement où un trafic primaire est présent. Les paramètres utilisés pour cette analyse sont : $\epsilon = 1.5$, $\sigma = 2.5$, $\mu = 3$, $\theta = 0.5$. Trois valeurs de p ont été étudiées : ($p = 0.2$, $p = 0.5$ et $p = 0.8$). Le graphique montre que W_q augmente avec le taux d'arrivée λ , surtout lorsque la probabilité d'accès direct p est faible. En effet, un faible p entraîne une accumulation plus importante d'utilisateurs secondaires en orbite, ce qui prolonge leur temps moyen d'attente. À l'inverse, un p plus élevé facilite l'accès direct au canal, ce qui réduit l'encombrement de l'orbite et par conséquent diminue significativement W_q .

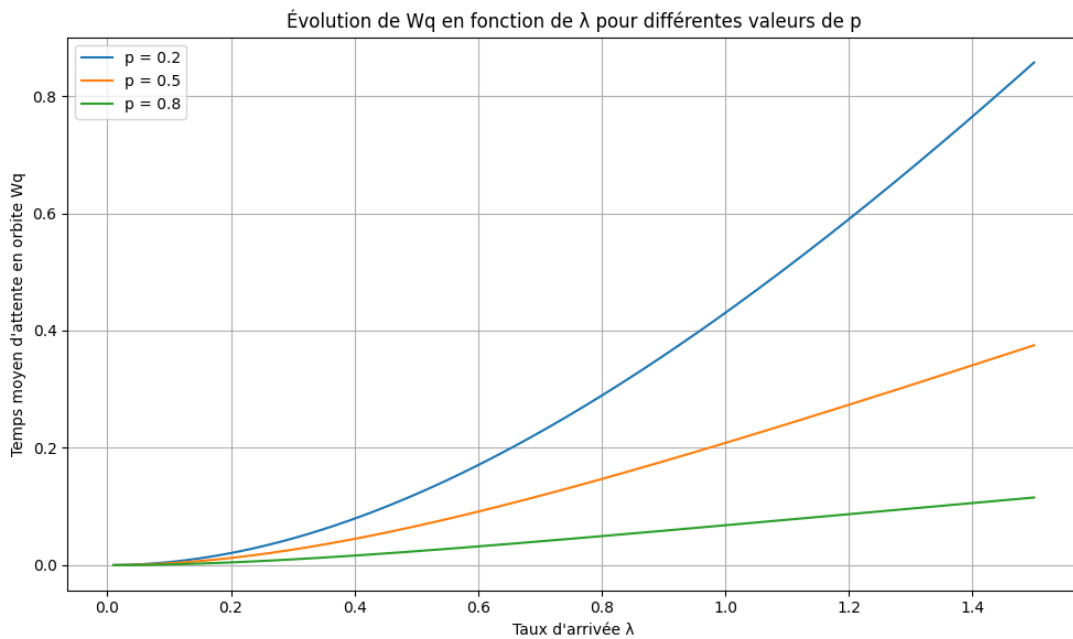


FIGURE 4.6 – W_q en fonction du taux d'arrivée λ .

La Figure 4.7 illustre l'impact du taux de rappel θ sur le temps moyen d'attente en orbite W_q , dans un contexte où un trafic primaire est présent. Les paramètres utilisés pour cette analyse sont : $\epsilon = 0.5$, $\sigma = 1$, $\mu = 1$, $p = 0.5$. Trois valeurs du taux d'arrivée des utilisateurs secondaires λ ont été examinées ($\lambda = 0.3$, $\lambda = 0.6$ et $\lambda = 0.9$). Le graphique montre que plus le taux de rappel θ est élevé, plus les clients secondaires tentent rapidement de se reconnecter, ce qui réduit leur temps moyen d'attente dans l'orbite. Cependant, lorsque le taux d'arrivée λ augmente, on observe que W_q reste relativement élevé, même pour des valeurs importantes de θ . Cela indique qu'en situation de forte demande, la saturation du canal limite l'efficacité des rappels fréquents.

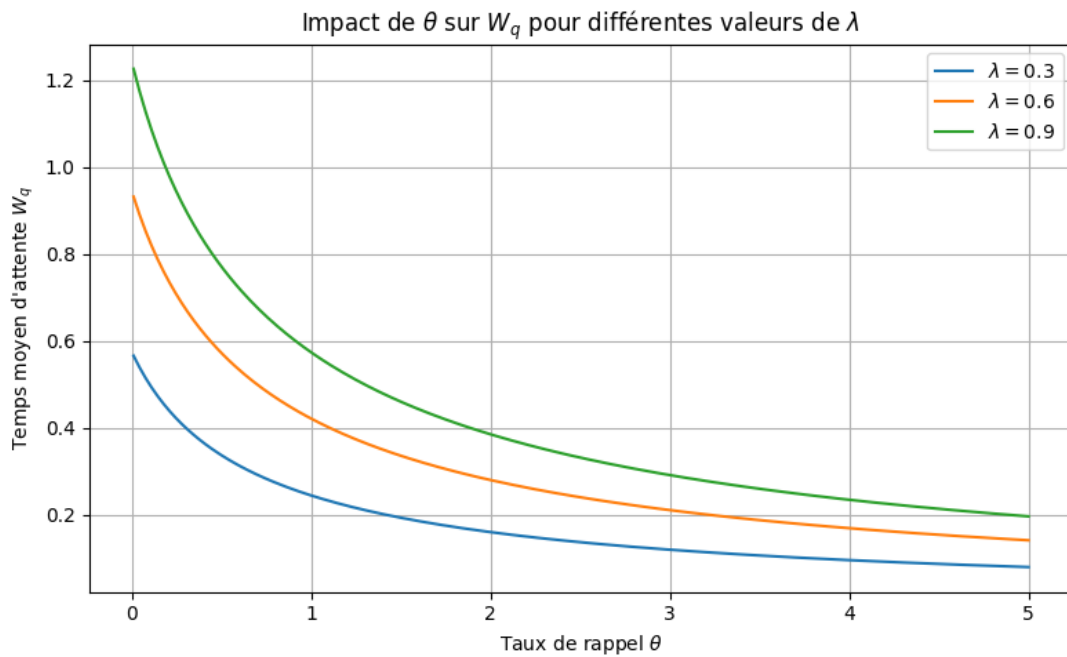


FIGURE 4.7 – W_q en fonction de θ pour différentes valeurs de λ .

4.2 Théorie des jeux

Modélisation du jeu

4.2.1 Les joueurs

Les joueurs sont les utilisateurs secondaires (SU).

Chaque SU est un joueur indépendant qui veut maximiser son profit (par exemple, envoyer ses données sans perdre trop de temps ni d'énergie).

4.2.2 Les stratégies

Chaque SU a deux choix possibles :

- **Entrer** : accéder au spectre (servi directement).
- **Mise en Orbite** : attendre en orbite en cas d'indisponibilité du canal.

4.2.3 Les gains

On suppose que l'orsque un SU est servi avec succès, il reçoit une récompense ω_s .

On suppose également que le coût de rester dans le système est $\chi(T)$ Où T : le temps de séjour total dans le système.

$\chi(T)$: devrait être une fonction croissante de T est un exemple linéaire simple et que

$$\chi(T) = CT.$$

Où :

- C : Coût unitaire.
- La durée totale T passée dans le système par un SU correspond à la somme du temps passé en orbite (en attente de rappel), noté T_q , et du temps de service effectif, noté T_s . Cette durée représente l'ensemble de la période durant laquelle le SU est exposé à l'arrivée potentielle d'un PU. Étant donné que le PU est prioritaire, il peut interrompre le SU à tout moment au cours de cette période, que ce soit pendant l'attente en orbite ou durant le service. Cette relation s'exprime par la formule suivante :

$$T = T_q + T_s$$

Alors le profit du SU peut être donné comme :

$$P = \omega_s - C.\epsilon.T \tag{4.1}$$

Où :

- ω_s : récompense brute obtenue après un service complet réussi.
- C : coût unitaire par unité de risque d'interruption.
- ϵ : taux d'arrivée des PU.
- T : durée totale pendant laquelle le SU est exposé à ce risque.

La formule P reflète le fait que plus le séjour du SU est long, plus il est exposé à un risque d'interruption, ce qui réduit d'autant son profit. Elle repose sur une estimation du coût moyen de perturbation causée par les PUs, proportionnelle au taux d'arrivée des PUs et à la durée d'exposition du SU.

• **Définition 4.1** Profit attendu d'un utilisateur secondaire en présence de n utilisateurs dans l'orbite.

Lorsqu'un SU accède au système et constate la présence de n SUs déjà en orbite, son profit espéré dépend du temps de séjour total auquel il sera confronté, et donc du niveau de congestion du système. En effet, plus n est grand, plus le temps d'attente (et donc le risque d'interruption par un PU) est élevé.

$$U(n) = \omega_s - C \cdot \epsilon \cdot T(n) \quad (4.2)$$

Où :

$$T(n) = T_q(n) + T_s$$

- $T(n)$ est le temps de séjour total d'un SU dans le système, dépendant du nombre n de SUs en attente au moment de son entrée.
- $T_q(n)$: le temps d'attente en orbite, fonction croissante du nombre de SUs dans l'orbite.

4.2.4 La matrice des gains

	SU2 : Entrer	SU2 : Orbitage
SU1 : Entrer	(U_E, U_E)	(U_E, U_O)
SU1 : Orbitage	(U_O, U_E)	(U_O, U_O)

Où :

$$U_E = \omega_s - C \cdot \epsilon \cdot T_E$$

T_E : temps total pour les SUs servis directement.

$$U_O = \omega_s - C \cdot \epsilon \cdot T_O$$

T_O : temps total incluant attente en orbite (fonction croissante du nombre n de SU en orbite).

4.2.5 Type de jeu

Ce jeu est un jeu statique, non coopératif, à information complète, avec stratégie mixte et interaction indirecte par congestion.

4.2.6 Équilibre de Nash

L'équilibre de Nash dans ce jeu dépend directement de la comparaison entre les gains associés aux deux stratégies possibles : l'entrée directe (UE) et l'attente en orbite (UO).

- Si $UE > UO$, alors le couple de stratégies (Entrer, Entrer) constitue un équilibre de Nash. Autrement dit, chaque utilisateur préfère entrer directement car le gain est supérieur à celui obtenu en orbitant.
- Si $UO > UE$, alors le couple (Orbitage, Orbitage) devient l'équilibre de Nash, car l'attente est plus avantageuse que l'entrée directe.
- Si $UE = UO$, alors les deux stratégies sont équivalentes : il existe un équilibre en stratégies mixtes, dans lequel chaque joueur choisit probabilistiquement entre les deux options.

Exemple illustratif d'application de l'équilibre de Nash

Dans le cadre de notre modélisation, nous avons considéré deux utilisateurs secondaires confrontés à une situation décisionnelle où ils doivent choisir entre deux stratégies : soit entrer directement dans le système lorsque le serveur est disponible, soit patienter dans l'orbite en cas d'occupation du canal. Pour illustrer cette situation, nous avons supposé les paramètres suivants :

- Récompense pour un service réussi : = 10 unités,
- Coût unitaire lié au risque d'interruption : $C = 1.5$ unités,
- Taux d'interruption dû aux utilisateurs primaires : = 1.2,
- Temps moyen de séjour si l'utilisateur entre directement : $T_E = 1.5$,
- Temps moyen de séjour en cas d'orbite : $T_O = 3.5$.

Les gains associés aux deux stratégies sont alors calculés comme suit :

- Gain en cas d'entrée directe :

$$U_E = \omega_s - C \cdot \epsilon \cdot T_E = 10 - 1.5 \times 1.2 \times 1.5 = 7.3$$

- Gain en cas de mise en orbite :

$$U_O = \omega_s - C \cdot \epsilon \cdot T_O = 10 - 1.5 \times 1.2 \times 3.5 = 3.7$$

La comparaison entre les deux résultats montre que $UE > UO$. Dans ce cas, les deux utilisateurs ont intérêt à adopter la stratégie consistant à entrer directement dans le système. Par conséquent, l'équilibre de Nash est atteint lorsque les deux joueurs choisissent cette stratégie, soit :

(Entrer, Entrer)

Conclusion

Ce chapitre a présenté un modèle M/M/1 avec rappels et pertes de clients, appliqué à la radio cognitive pour analyser l'accès des utilisateurs secondaires au spectre. Les performances du système ont été étudiées théoriquement puis illustrées numériquement via des simulations Python. Une analyse basée sur la théorie des jeux a également été introduite pour modéliser les décisions stratégiques des utilisateurs, ouvrant ainsi des pistes d'optimisation pour les réseaux cognitifs.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressées à l'amélioration des performances des réseaux radio cognitive en combinant deux outils mathématiques complémentaires : la théorie des files d'attente et la théorie des jeux. Cette étude s'inscrit dans un contexte de croissance rapide des communications sans fil, où la gestion du spectre radioélectrique reste un défi important.

Nous avons d'abord étudié la radio cognitive, une technologie capable d'adapter l'usage du spectre radio en fonction de son environnement. Ensuite, nous avons modélisé le système à l'aide d'un modèle de file d'attente M/M/1 avec rappels et interception des services, afin de représenter les tentatives successives des utilisateurs secondaires pour accéder au réseau. Puis, nous avons intégré la théorie des jeux afin de modéliser les choix stratégiques et rationnels de ces utilisateurs dans un contexte non coopératif.

Nous avons construit un modèle analytique qui représente à la fois les phénomènes d'attente, les pertes de clients et les stratégies rationnelles des utilisateurs. Grâce aux illustrations numériques, nous avons montré l'impact de plusieurs paramètres (comme le taux d'arrivée, le taux de service ou encore le taux de rappel) sur les performances globales du système.

À travers ce travail, nous avons montré que la combinaison des files d'attente et de la théorie des jeux peut permettre une gestion plus efficace et plus équilibrée du spectre, en rendant les communications à la fois plus fluides et plus justes. Pour conclure, nous pensons que notre modèle pourrait servir de base à des recherches futures, notamment en y intégrant des techniques d'intelligence artificielle ou des dynamiques multi-agents pour aller encore plus loin dans l'adaptabilité des réseaux cognitifs.

Bibliographie

- [1] **M.Benhamida et B.Benyahia**, Mémoire de master : Utilisation de la théorie des jeux dans les réseaux de radio cognitive pour l'accès dynamique au spectre, Université Abou Bakr Belkaid - Tlemcen 2013.
- [2] National Telecommunications and Information Administration, manual of regulation and procedures for federal radio frequency management, United States Department of commerce May 2012.
- [3] **B.Benmammam**, Présentation de la radio cognitive, Université Abou Bakr Belkaid -Tlemcen 2012.
- [4] **S.Tacheraft** ,Mémoire de master : Modélisation des tentatives d'accès au canal sans fil radio cognitive, Université Abderahmane Mira - Béjaia 2024.
- [5] **B.Benmammam et A.Amraoui**, Radio Ressource Allocation and Dynamic Spectrum Access 2012.
- [6] **L.Collard**, Cours de théorie des jeux Licence, Université René Descartes Paris V–Sorbonne France 2022.
- [7] **S.Bouziane et B.Mohammedi** , Mémoire de master : Application des jeux coopératifs dans un réseau de distributeurs de billets de banques, Université Mouloud Mammeri -Tizi-ouzou 2014.
- [8] **Y.Dominicy**, Cours de la Théorie des jeux : représentations et types de jeux, Solvay Brussels School of Economics and Management Université libre - Bruxelles Ecares.
- [9] **I.Ngom et L.Diouf** , Project de Master Professionnel Télécommunications : La radio cognitive, Université des Sciences et Technologies - Lille 2008.
- [10] **A.Akyldiz** , Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks : A survey. Computer Networks 2006.
- [11] **S.Radjef** , Cours de la théorie des jeux :théorie des jeux appliquée aux Réseaux, Université Abderahmane Mira - Bejaia 2025.

- [12] **D.Kendall**, Some problems in the theory of queues, Journal of the Royal Statistical Society : Series B (Methodological) 1953.
- [13] **D.Kendall**, Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and Their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain : The Annals of Mathematical Statistics, Institute of Mathematical Statistics 1953.
- [14] **S.Mehta et K.Kwak**, Game Theory and Cognitive Radio Based Wireless : In Agent and Multi-Agent Systems Technologies and Applications Networks, Université Inha - Korea 2009.
- [15] **F.Benidris**, Thèse de doctorat : Gestion intelligente de spectre et de routage dans un contexte radio cognitive par apprentissage, Université Abou Bakr Belkaid - Tlemcen 2016.
- [16] **Z.Chang et T.Ristaniemi**, Article dans IEEE Communications Letters : Jeu de file d'attente pour l'accès au spectre dans Réseaux radio Cognitive 2015.
- [17] **N.Khider et B.Rofia**, Mémoire de master : Jeu de file d'attente pour l'accès au spectre dans les Réseaux Radio Cognitifs, Université Abderahmane Mira - Béjaia 2022.
- [18] **A.Amraoui** , Thèse de doctorat : Vers une architecture multi-agents pour la radio cognitive opportuniste, Université Abou Bakr Belkaid - Tlemcen 2014.
- [19] **D.Niyato et E.Hossain**, Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks : A dynamic game approach 2008.
- [20] **Moumena et Ahmed**, Thèse de doctorat : Détection rapide et large-bande de brouilleurs au niveau de la radio cognitive, Université Saad-Dahlab–Blida 1 2016.
- [21] **Y.Mao et T.Cheng et H.Zhao et N.Shen**, Multiple-seller and multiple-buyer spectrum sharing model in cognitive radio-based wireless sensor network 2017.
- [22] **J.Little**, A proof of the queueing formula $\lambda.w = 1$ *OpenrationsResearch*1961.
- [23] **L.LamiaL et D.Aïssani et K.Adel-Aïssanou et K.Barkaoui**, M/M/1 retrial queue with collisions and transmission errors. Quality Technology and Quantitative Management 2019
- [24] **L.Lakaour et D.Aïssani et K.Adel-Aïssanou et K.Barkaoui et S.Ziani**, An unreliable single server retrial queue with collisions and transmission errors. Communications in Statistics - Theory and Methods 2022.
- [25] **J.Artalejo et A.Gomez-Corral**, Retrial queueing systems : A computational approach, Springer, Berlin 2008.

Résumé

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressées à la radio cognitive, une technologie innovante qui vise à optimiser l'utilisation des fréquences disponibles dans les réseaux sans fil. Plutôt que de laisser certaines bandes de fréquences inutilisées, la radio cognitive permet à des utilisateurs dits *secondaires* d'y accéder temporairement, sans perturber les utilisateurs *primaires* qui en détiennent les droits.

La gestion de cet accès partagé au spectre pose cependant plusieurs défis, notamment en matière de files d'attente, de priorités et de risques de congestion. Pour modéliser et analyser ces aspects, nous avons fait appel à deux outils mathématiques complémentaires :

- **Les files d'attente**, à travers un modèle M/M/1 avec rappels, afin de représenter le comportement des utilisateurs secondaires mis en attente lorsqu'un canal est occupé.
- **La théorie des jeux**, qui nous a permis d'étudier les stratégies possibles des utilisateurs en fonction des décisions des autres, dans un contexte d'accès concurrentiel aux ressources.

En combinant ces deux approches, nous avons pu modéliser et analyser le comportement des utilisateurs dans un réseau radio cognitive. Cela nous a permis de voir comment les décisions individuelles influencent le fonctionnement global du réseau, en particulier sur le temps d'attente.

Mots clé : Radio Cognitive, Files d'attente avec rappels, utilisateurs secondaires, utilisateurs primaires, Fonction génératrice, théorie des jeux, orbite.

Abstract

In this Memory, we focused on cognitive radio, an innovative technology that aims to optimize the use of available frequencies in wireless networks. Rather than leaving certain frequency bands unused, cognitive radio allows temporarily access them without disrupting the primary users who hold the rights to them.

However, managing this shared access to the spectrum poses several challenges, particularly in terms of queues, priorities, and the risk of congestion. To model and analyze these aspects, we used two complementary mathematical tools :

- **Queues**, using an M/M/1 model with callbacks, to represent the behavior of secondary users placed on hold when a channel is busy.
- **Game theory**, which allowed us to study the possible strategies of users based on the decisions of others, in a context of competitive access to resources.

By combining these two approaches, we were able to model and analyze user behavior in a cognitive radio network. This allowed us to see how individual decisions influence the overall functioning of the network, particularly in terms of waiting time.

Keywords : Cognitive Radio, Queues with callbacks, secondary users, primary users, generating function, game theory, orbit.