

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**

---

**Modélisation du protocole de communication TDMA dans la  
radio cognitive via les files d'attente**

---

Présenté par :

**M<sup>r</sup> IRATEN Aksal Hamza**

**M<sup>r</sup> BELDJERROU Aymene**

**Sous la direction de : Pr K. ADEL-AISSANOU**

**Et de : Pr O.LEKADIR**

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

M <sup>r</sup> N.Touche	Professeur	Président du jury	UAMB - Bejaia.
M <sup>me</sup> L.Bachiri	M.C. classe/ A	Examinatrice	UAMB - Bejaia.
M <sup>elle</sup> M. Talantikit	Doctorante	Examinatrice	UAMB - Bejaia.

**Année Universitaire 2024 – 2025**

# Remerciements

Avant toute chose, nous exprimons notre profonde gratitude envers Dieu tout-puissant, pour la force, la patience et la persévérance qu'il nous a accordées tout au long de cette aventure. Ce mémoire représente bien plus qu'un simple travail académique : c'est l'aboutissement d'un parcours fait d'efforts, d'engagement et de précieuses rencontres.

Nous tenons à remercier chaleureusement nos encadrantes : **Mme K. ADEL-AISSANOU et O. LEKADIR**, pour leur accompagnement constant, leur disponibilité, leurs conseils avisés et leur bienveillance. Leur soutien nous a guidés à chaque étape de cette recherche, et nous leur en sommes profondément reconnaissants.

Nos remerciements vont également à l'ensemble de nos enseignants, qui ont su, au fil des années, nous transmettre leur savoir avec passion et rigueur. Chacun, à sa manière, a contribué à notre formation et à notre évolution.

Un merci tout particulier à nos familles et à nos amis, pour leur soutien moral sans faille, leur patience et leurs encouragements, surtout dans les moments de doute. Leur présence à nos côtés a été une source précieuse de motivation.

Enfin, merci à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail. À vous tous : **merci du fond du cœur.**

# Dédicace

Nous dédions ce mémoire

À nos parents, pour leur amour et leurs sacrifices qui nous ont permis de  
poursuivre nos rêves.

À nos familles et à nos amis,  
dont le soutien inconditionnel et les encouragements constants  
ont rendu ce travail possible.

**Hamza & Aymene**

# Table des matières

<b>Remerciements</b> . . . . .	I
Dédicace . . . . .	II
Liste des figures . . . . .	VI
Liste d'abréviations et notations . . . . .	VII
<b>Introduction générale</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>1 Le protocole TDMA dans la radio cognitive</b> . . . . .	<b>3</b>
Introduction . . . . .	3
1.1 Réseaux sans fil . . . . .	4
1.1.1 Définition . . . . .	4
1.1.2 Catégories de réseau sans fil . . . . .	4
1.1.3 Classification des réseaux sans fil . . . . .	5
1.2 Généralités sur la radio cognitive . . . . .	6
1.2.1 Concepts et définitions . . . . .	6
1.3 Fonctions de la Radio Cognitive . . . . .	7
1.3.1 Détection du spectre . . . . .	7
1.3.2 Gestion du spectre . . . . .	8
1.3.3 Mobilité du spectre . . . . .	9
1.4 Techniques d'accès Multi-Utilisateurs . . . . .	9
1.4.1 Accès Multiple à Répartition en Fréquence (FDMA) . . . . .	10
1.4.2 Accès Multiple à Répartition dans le Temps (TDMA) . . . . .	11
1.4.3 Accès Multiple à Répartition de Code (CDMA) . . . . .	13
1.5 Évolution du TDMA à travers les générations . . . . .	14
1.5.1 TDMA dans les premières générations cellulaires . . . . .	14
1.5.2 Transition vers la 5G . . . . .	14
1.6 Gestion Dynamique de l'Accès des SUs dans un Réseau à Radio Cognitive utilisant le Protocole TDMA . . . . .	15
1.7 Nœuds malicieux . . . . .	16
1.7.1 Définition . . . . .	16
1.7.2 Gestion des SUs malicieux par le TDMA . . . . .	16
1.8 Domaines d'application . . . . .	17
1.9 Position du Problème . . . . .	17
1.10 Conclusion . . . . .	18

<b>2</b>	<b>Les files d'attente</b>	<b>19</b>
	Introduction	19
2.1	Caractéristiques	20
2.1.1	Flux d'arrivée	20
2.1.2	Serveur	20
2.1.3	Discipline de service	20
2.2	Notion de classe de clients	21
2.3	Notations de Kendall	21
2.4	Formule de Little	22
2.5	Types de modèle	22
2.5.1	Modèles markoviens	23
2.5.2	Modèles non markoviens	23
2.6	Vacances dans le système de files d'attente	23
2.7	Système de files d'attente avec vacance unique et vacances multiples	24
2.7.1	Système de files d'attente avec vacance unique	24
2.7.2	Système de files d'attente avec vacances multiples	24
2.8	Conclusion	25
<b>3</b>	<b>État de l'art sur quelques travaux modélisant le protocole TDMA</b>	<b>26</b>
	Introduction	26
3.1	Sécurité et gestion de l'énergie dans les réseaux cognitifs WSNs via théorie des jeux	27
3.2	Modélisation Mathématique du TDMA dans les Réseaux Satellitaires	27
3.3	Ordonnancement décentralisé TDMA au niveau de la couche MAC dans les réseaux maillés radio cognitifs	28
3.4	Modélisation du protocole TDMA par files d'attente pour la gestion de la QoS dans les RCSF	28
3.5	Transmission vidéo sur réseaux radio cognitifs TDMA sous contraintes de collisions	29
3.6	Analyse des Performances des Systèmes OFDM-TDMA par la Théorie des Files d'Attente	29
3.7	Modélisation analytique des performances dans les réseaux maillés TDMA sans collision	30
3.8	Optimisation de l'Accès Temporel au Canal dans un Réseau WSN par Théorie des Graphes	30
3.9	Contrôle de transmission dans les réseaux de radio cognitive	30
3.10	Conception croisée et routage géographique dans les réseaux radio cognitifs ad hoc	31
3.11	Conclusion	31
<b>4</b>	<b>Modélisation de TDMA dans la radio cognitive avec le système <math>M/M(a,b)/1</math>.</b>	<b>33</b>
	Introduction	33
4.1	Modélisation	34
4.2	Description du modèle	34
4.3	Stabilité du système	36
4.3.1	Condition de stabilité	36

---

4.4	Caractéristiques du système . . . . .	37
4.5	Illustrations numériques . . . . .	38
4.6	Conclusion . . . . .	42
	<b>Conclusion générale</b>	<b>43</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>46</b>
	<b>Résumé</b>	<b>47</b>

# Table des figures

1.1	<b>Réseau cellulaire classique.</b>	5
1.2	<b>Réseau Ad hoc.</b>	6
1.3	<b>Architecture d'un réseau à radio cognitive.</b>	7
1.4	<b>Accès au spectre Coopératif et non-coopératif.</b>	9
1.5	<b>Classification des protocoles de contrôle d'accès au support.</b>	10
1.6	<b>Accès multiple à répartition en fréquence (FDMA).</b>	11
1.7	<b>Accès multiple à répartition dans le temps TDMA .</b>	12
1.8	<b>Combinaison des deux techniques TDMA et FDMA.</b>	12
1.9	<b>Accès Multiple à répartition de code.</b>	13
2.1	<b>Représentation d'une de file d'attente simple.</b>	20
4.1	<b>Diagramme de transitions du système .</b>	35
4.2	<b><math>L_0</math> en fonction de <math>a</math> pour différentes valeurs de <math>\lambda</math>.</b>	39
4.3	<b><math>L_0</math> en fonction de <math>\theta_2</math> pour différentes valeurs de <math>\lambda</math>.</b>	39
4.4	<b><math>L_1</math> en fonction de <math>\theta_1</math> pour différentes valeurs de <math>a</math>.</b>	40
4.5	<b><math>L_1</math> en fonction de <math>\mu</math> pour différentes valeurs de <math>a</math>.</b>	41
4.6	<b><math>L_2</math> en fonction de <math>\theta_2</math> pour différentes valeurs de <math>\lambda</math>.</b>	42

# Liste d'abréviations et notations

Wifi	Réseau Local sans Fil
QoS	Qualité de Service
LAN	réseau local
WPAN	Les reseaux Personnel sans fil
WLAN	Reseaux locaux sans fil
WMAN	Reseaux métropolitains sans fil
WWAN	reseaux étendus sans-fil
KTH	Institut Royal de Technologie
RKRL	Langage de Représentation des Connaissances Radio
SU	Utilisateur Secondaire
PU	Utilisateur Primaire
RC	Radio Cognitive
IOT	Internet des Objets
TDMA	Accès multiple par répartition temporelle
FDMA	Accès multiple par répartition en fréquence
CDMA	Accès multiple par répartition en code
CSMA	Accès multiple avec détection de porteuse
OFDMA	Accès multiple par répartition orthogonale en fréquence
OFDM	Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence
FRSS	Sélection aléatoire d'un client en attente
CRN	Réseau Radio Cognitif
AMPS	Système avancé de téléphonie mobile
GSM	Système Global de Communications Mobiles
LTE	Évolution à long terme
CR-BS	Station de base radio cognitive
FC	Centre de fusion
SSDF	Falsification des données de détection du spectre
WSN	Réseau de Capteurs Sans Fil
RCSF	Réseau de Capteurs Sans Fil
EF	Transfert Expéditif
LT codes	Codes de transformation de Luby
SNR	Rapport signal sur bruit
TSCH	Saut de canal à intervalles de temps définis
COOJA	Simulateur de réseaux de capteurs dans Contiki
Orchestra	Mécanisme automatique de planification pour TSCH

---

MAC	Contrôle d'accès au canal radio
FIFO	Premier arrivé, premier servi
LIFO	Dernier arrivé, premier servi
FCFS	Premier entré, premier sorti
IDs	Identifiants

# Introduction générale

L'essor rapide des technologies de communication sans fil a profondément transformé notre société. Des réseaux cellulaires jusqu'aux connexions Wi-Fi, en passant par les objets connectés et les communications satellitaires, la transmission sans fil s'impose de nos jours comme un pilier incontournable des systèmes de télécommunication modernes. Cette transmission repose sur une ressource traditionnelle, mais aussi limitée : le spectre radioélectrique [10]. Il s'agit de l'ensemble des fréquences utilisées pour transférer des données sans support physique.

Cependant, malgré cette forte augmentation de la demande, plusieurs études ont révélé une sous-utilisation importante du spectre. En effet, les méthodes traditionnelles d'allocation partagent les bandes de fréquences de manière statique, en les affectant à des utilisateurs ou services spécifiques, appelés utilisateurs primaires, sans tenir compte de leur usage réel. Une inégalité dans l'utilisation des ressources engendre une certaine rigidité : certaines bandes sont totalement saturées, notamment aux heures de pointe, tandis que d'autres restent vacantes pendant de longues périodes, selon l'heure ou la position géographique.

Afin de remédier à cette inefficacité, nous nous intéressons à une solution technologique innovante : la radio cognitive [4]. Cette technologie, considérée comme une évolution intelligente de la radio logicielle [20], permet aux dispositifs sans fil de détecter dynamiquement les bandes disponibles dans le spectre, de prendre des décisions autonomes quant à leur exploitation, et de s'adapter en temps réel à leur environnement, sans provoquer d'interférences avec les utilisateurs primaires. Ces dispositifs, désignés sous le nom d'utilisateurs secondaires (SU), peuvent ainsi accéder de manière opportuniste aux bandes temporairement libres du spectre, contribuant à une meilleure efficacité globale.

Dans un tel environnement, l'un des défis majeurs concerne la gestion de l'accès au canal partagé entre plusieurs utilisateurs secondaires. Pour éviter les collisions et garantir une transmission ordonnée et efficace, il est indispensable de mettre en place des protocoles d'accès multiple. Parmi eux, nous étudions le protocole TDMA [8], qui repose sur une division du temps en créneaux fixes, appelés slots. Chaque utilisateur secondaire se voit attribuer un slot précis durant lequel il peut transmettre ses données. Ce mécanisme permet de limiter les interférences, de réduire les pertes de paquets, et d'améliorer l'exploitation du spectre.

Pour évaluer les performances d'un tel système dans un environnement radio cognitif, nous adoptons une modélisation mathématique fondée sur la théorie des files d'attente. Le modèle  $M/M(a, b)/1$  est particulièrement adapté, car il permet de représenter un système à capacité limitée, avec activation du service à partir d'un seuil  $a$  et blocage au-delà d'une limite  $b$ . Ce cadre convient bien aux réseaux cognitifs à accès opportuniste, notamment ceux utilisant le protocole

TDMA. Des travaux tels que ceux de Parimala et Palaniammal [28], ainsi que Li et Zhao [33], ont montré la pertinence des files d'attente avec vacances dans des contextes similaires, ce qui justifie notre choix de ce modèle dans le présent travail.

Ce mémoire se compose de quatre chapitres principaux. Dans le premier chapitre, nous présentons le protocole TDMA et son rôle dans les réseaux de radio cognitive. Le deuxième chapitre est consacré à la théorie des files d'attente et à quelques modèles associés. Le troisième chapitre présente un état de l'art des travaux de recherche combinant le protocole TDMA avec des outils mathématiques pour modéliser les performances des systèmes de communication. Enfin, dans le quatrième chapitre, nous apportons notre contribution personnelle en proposant une modélisation du protocole TDMA dans la radio cognitive à l'aide d'un système d'attente  $M/M(a, b)/1$ . Nous étudions alors les performances du système de [15], validons les résultats par des applications numériques et analysons l'influence de certains paramètres sur ces performances.

Cette application numérique est issue d'un programme que nous avons conçu en utilisant le langage de programmation Python, en raison de la richesse de ses bibliothèques scientifiques qui facilitent le traitement des données et la visualisation des résultats.

# 1

## Le protocole TDMA dans la radio cognitive

### Introduction

Avec la croissance exponentielle des communications sans fil, l'optimisation du spectre radioélectrique est devenue pour nous un enjeu majeur. La radio cognitive nous offre une solution à ce problème en permettant une gestion dynamique des fréquences [8], notamment grâce à des techniques avancées de partage du spectre. Le protocole TDMA se démarque clairement par sa capacité à organiser l'accès au spectre de manière structurée et efficace, ce qui le rend particulièrement intéressant pour nos travaux.

Ce protocole fonctionne par segmentation temporelle des transmissions, en allouant à chaque utilisateur des créneaux horaires discrets. Cette méthode se révèle particulièrement efficace dans le contexte de la radio cognitive (RC), car elle nous permet, en tant qu'utilisateurs secondaires, d'exploiter les fréquences disponibles de manière opportuniste, sans perturber les utilisateurs primaires.

Dans ce chapitre, nous allons explorer les principes fondamentaux du TDMA, mettre en évidence son intégration dans un contexte de radio cognitive, et souligner les avantages qu'il offre pour une gestion optimisée du spectre radioélectrique.

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>3</b>
<b>1.1 Réseaux sans fil</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>1.2 Généralités sur la radio cognitive</b> . . . . .	<b>6</b>
<b>1.3 Fonctions de la Radio Cognitive</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>1.4 Techniques d'accès Multi-Utilisateurs</b> . . . . .	<b>9</b>
<b>1.5 Évolution du TDMA à travers les générations</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>1.6 Gestion Dynamique de l'Accès des SUs dans un Réseau à Radio Cognitive utilisant le Protocole TDMA</b> . . . . .	<b>15</b>
<b>1.7 Nœuds malicieux</b> . . . . .	<b>16</b>

---

<b>1.8 Domaines d'application</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>1.9 Position du Problème</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>1.10 Conclusion</b> . . . . .	<b>18</b>

---

## 1.1 Réseaux sans fil

### 1.1.1 Définition

Un réseau sans fil (ou Wireless LAN, WLAN, selon la norme IEEE 802.11) est une infrastructure de communication permettant à plusieurs terminaux d'échanger des données sans recourir à une liaison filaire [14]. La transmission s'effectue par le biais d'ondes électromagnétiques, principalement radio ou infrarouges.

Ce réseau est très flexible à l'usage, puisqu'il ne repose pas sur la position de place fixe des appareils. Les utilisateurs peuvent donc circuler librement dans un champ de couverture (plus ou moins large) tout en maintenant leur adéquation au réseau. Cette mobilité le rend une solution première pour beaucoup d'environnements, qu'ils soient domestiques, privés ou publics.

### 1.1.2 Catégories de réseau sans fil

Les réseaux sans fil peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction de leur \*périmètre de couverture géographique\* [31]. Chaque type répond à des besoins spécifiques en matière de portée, de débit et d'usages. On distingue principalement :

- **Réseaux Personnel sans fil (WPAN)** : Ces des réseaux qui ont des portées très courtes, typiquement quelques dizaines de mètres. Ils sont correctement à usage personnelle, comme la communication entre périphériques d'un même utilisateur. Les technologies largement adoptées comptent parmi lesquelles se trouvent *Bluetooth*, *ZigBee* et les liaisons *infrarouges*.
- **Réseaux locaux sans fil (WLAN)** : Ces réseaux sont conçus pour couvrir un espace équivalent à celui d'un réseau local, tel qu'un bâtiment ou une entreprise, avec une portée moyenne d'environ 100 mètres. Les technologies associées incluent notamment le *Wi-Fi* et le *HiperLAN2* (High Performance Radio LAN 2.0).
- **Réseaux métropolitains sans fil (WMAN)** : Basés sur la norme *IEEE 802.16*, ces réseaux sont aussi appelés *boucles locales radio (BLR)*. Ils permettent une connectivité haut débit (de 1 à 10 Mbit/s) sur une portée allant de 4 à 10 km, ce qui les rend adaptés à la couverture d'une ville ou d'une zone urbaine étendue.
- **Réseaux étendus sans-fil (WWAN)** : Aussi appelés à la manière de *réseaux cellulaires mobiles*, ces réseaux offrent une grande échelle de connectivité. Ils sont appliqués pour la téléphonie mobile et les données à travers de vastes territoires. Les principales technologies sont *GSM* (Global System for Mobile Communication), *GPRS* (General Packet

Radio Service), *UMTS* (Universal Mobile Telecommunication System), et leurs plus récentes générations telles que *4G* et *5G*.

### 1.1.3 Classification des réseaux sans fil

Les réseaux mobiles ou sans fil, peuvent être classés en deux classes : les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure.

#### Réseaux sans fil avec infrastructure

Ce modèle repose sur deux types d'entités :

Les sites fixes, généralement constitués de stations de base reliées entre elles par des liaisons filaires.

Les sites mobiles, qui représentent les terminaux utilisateurs (téléphones, ordinateurs portables, etc.).

Les stations de base assurent la liaison entre le réseau filaire (noyau du réseau) et les terminaux mobiles à l'aide d'une interface radio [31]. Ce modèle est typique des architectures cellulaires et WLAN à infrastructure, où la communication entre les terminaux passe nécessairement par une station de base ou un point d'accès.

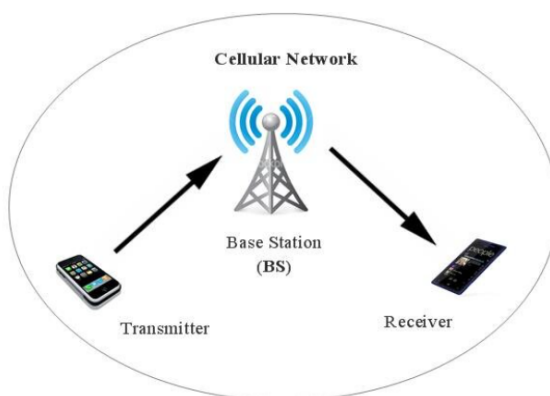


FIGURE 1.1 – Réseau cellulaire classique.

#### Réseaux sans fil sans infrastructure (ad hoc)

Les réseaux sans fil sans infrastructure, ou réseau ad hoc, donnent aux nœuds la permission de communiquer les uns et les autres directement, sans station de base ou infrastructure en place[29]. Toute station dans ce type de réseau est mobile et est en plus utilisée comme terminal utilisateur et relais pour transmettre les données vers d'autres stations.

Un exemple classique de ce processus est celui des réseaux ad hoc, où les unités mobiles utilisent les liens radio afin d'établir la communication de manière autonome, sans administration centrale.

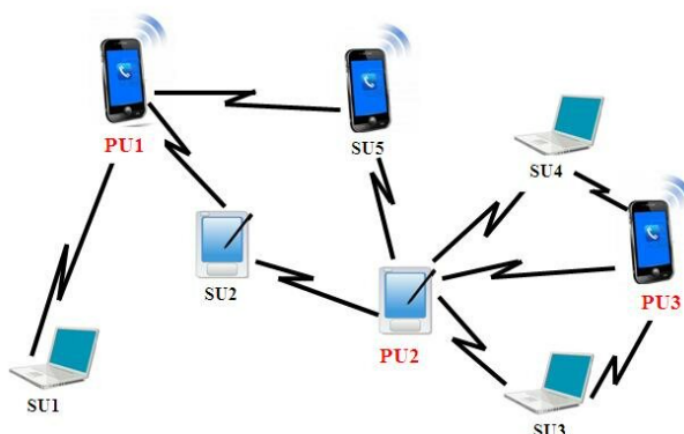


FIGURE 1.2 – Réseau Ad hoc.

## 1.2 Généralités sur la radio cognitive

Le concept de radio cognitive a été introduit par Joseph Mitola III en 1998 lors d'un séminaire à l'Institut royal de technologie en Suède (KTH). Ses recherches portaient sur le langage de représentation de la radio (RKRL) et sur les moyens d'accroître la flexibilité des services sans fil [9]. La radio cognitive représente une approche innovante dans le domaine des communications sans fil. Mitola la définit comme une radio utilisant un modèle de raisonnement pour atteindre un niveau de compétence spécifique dans les domaines liés à la radio.

### 1.2.1 Concepts et définitions

Un réseau à radio cognitive (Cognitive Radio Network ou CRN) est un réseau sans fil prometteur en matière d'utilisation du spectre radio [4], dans lequel certains nœuds du réseau sont des terminaux intelligents équipés de la technologie radio cognitive. Ces terminaux sont capables d'accéder au spectre de manière opportuniste pour exploiter les parties inutilisées. Les CRNs forment une nouvelle catégorie d'utilisateurs qui tentent d'exploiter les bandes de fréquences sous-utilisées. Ainsi, on distingue deux principaux types d'acteurs dans un CRN : les utilisateurs secondaires et les utilisateurs primaires.

- **Utilisateur Secondaire (Secondary User ou SU)** : C'est un utilisateur à radio cognitive qui ne possède pas de licence et souhaite utiliser les parties libres du spectre.
- **Utilisateur Primaire (Primary User ou PU)** : C'est un utilisateur qui possède une licence pour opérer dans une bande de fréquences bien spécifique. Il est donc prioritaire pour l'utilisation de cette bande de spectre.

Les SUs peuvent accéder aux bandes de spectre inoccupées en l'absence des PUs et doivent libérer le canal dès qu'un PU souhaite y accéder. Toutefois, les SUs peuvent continuer à utiliser ces bandes sous réserve d'obtention de l'accord du PU.

Akyildiz présente une architecture de réseau à radio cognitive composée de deux principaux groupes :

- **Réseau primaire**, regroupant les PUs.
- **Réseau secondaire**, regroupant les SUs, appelé également réseau à accès dynamique au spectre.

Un réseau à radio cognitive peut également inclure un ( broker ), chargé de distribuer les ressources spectrales entre les différents réseaux secondaires. Cette architecture peut être illustrée par une figure.

Dans ce type de réseau, on peut également trouver des stations de base (BS) secondaires et primaires si le réseau est doté d'une infrastructure. Les BS secondaires (ou primaires, respectivement) assurent le contrôle des activités des SUs (ou des PUs, respectivement).

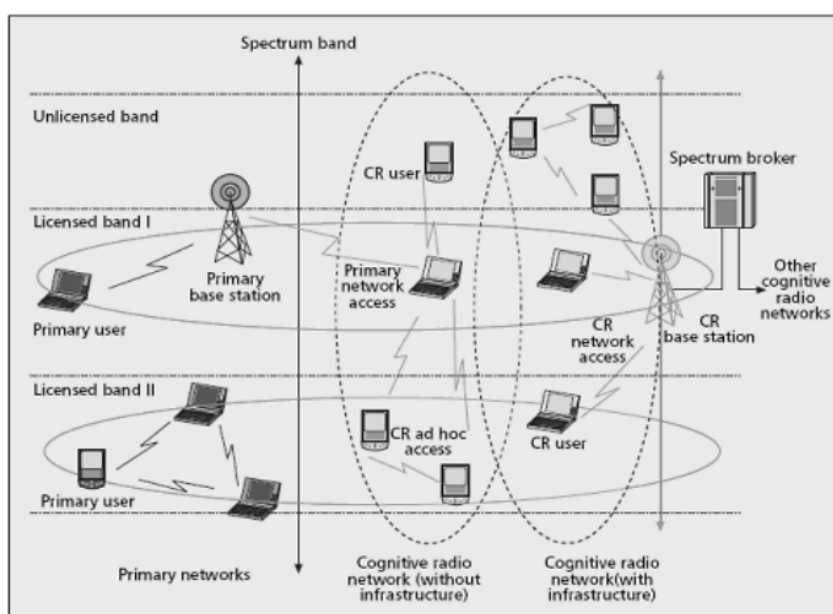


FIGURE 1.3 – Architecture d'un réseau à radio cognitive.

## 1.3 Fonctions de la Radio Cognitive

Les principales fonctions de la RC sont les suivantes :

### 1.3.1 Détection du spectre

La détection du spectre est une fonctionnalité de base qui consiste à identifier les portions du spectre non utilisées et à les partager sans interférer avec d'autres utilisateurs [4]. L'objectif principal est de déterminer l'état du spectre (libre/occupé) afin qu'un utilisateur secondaire (SU) puisse y accéder tout en respectant les contraintes liées aux interférences. Le principal défi

réside dans la mesure précise de l'interférence au niveau du récepteur primaire, causée par les transmissions des utilisateurs secondaires.

### 1.3.2 Gestion du spectre

Capter les meilleures fréquences disponibles pour répondre aux besoins de communication des utilisateurs [4]. Les RCs devraient décider de la meilleure bande de fréquence pour répondre aux exigences de qualité de service sur toutes les bandes de fréquences disponibles, donc les fonctions de gestion du spectre sont nécessaires pour les RCs. Ces fonctions de gestion peuvent être classées comme suit :

1. **Analyse du spectre** : les résultats obtenus de la détection du spectre sont analysés pour estimer sa qualité. Une des questions qui se posent est de savoir comment mesurer la qualité du spectre qui peut être accédé par un SU. Cette qualité est caractérisée par le rapport signal/bruit, la durée moyenne et la corrélation de la disponibilité des espaces blancs du spectre. Cependant, les informations sur cette qualité peuvent être imprécises et bruyantes. Des algorithmes d'apprentissage de l'Intelligence Artificielle sont des techniques qui peuvent être employées par les utilisateurs de la RC pour l'analyse du spectre.
2. **Décision sur le spectre** : un modèle de décision est nécessaire pour l'accès au spectre. La complexité de ce modèle dépend des paramètres considérés lors de l'analyse du spectre.

Le modèle de décision devient plus complexe quand un SU a des objectifs multiples. Par exemple, un SU peut avoir l'intention de maximiser son rendement tout en minimisant les perturbations causées à l'utilisateur primaire. Les méthodes d'optimisation stochastique seront un outil intéressant pour modéliser et résoudre le problème d'accès au spectre dans un environnement RC.

Lorsque plusieurs utilisateurs (à la fois primaires et secondaires) sont dans le système, leur préférence va influencer sur la décision d'accès au spectre. Ces derniers peuvent être coopératifs ou non coopératifs, comme le montre la Figure 1.2. Dans un environnement coopératif, les RCs coopèrent les uns avec les autres pour prendre une décision pour accéder au spectre et maximiser une fonction objectif commune en tenant compte des contraintes. Dans un tel scénario, un contrôleur central peut coordonner la gestion du spectre.

Dans un environnement multi-utilisateur distribué, pour un accès non-coopératif au spectre, chaque utilisateur parvient à une décision optimale de façon indépendante en observant le comportement (historique/action) des autres utilisateurs du système. Par conséquent, un algorithme distribué est nécessaire pour un SU afin de prendre la décision sur l'accès au spectre de manière autonome.

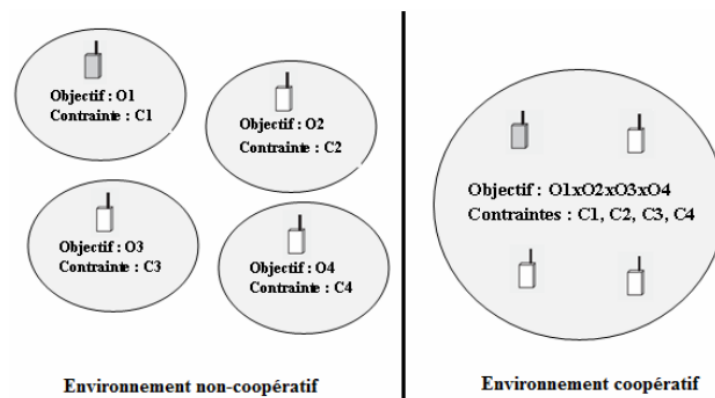


FIGURE 1.4 – Accès au spectre Coopératif et non-coopératif.

### 1.3.3 Mobilité du spectre

C'est le processus qui permet à l'utilisateur de la RC de changer sa fréquence de fonctionnement [4]. Les réseaux RC utilisent le spectre de manière dynamique en permettant à des terminaux radio de fonctionner dans la meilleure bande de fréquence disponible, tout en maintenant les exigences de communication transparentes lors de la transition vers une meilleure fréquence.

## 1.4 Techniques d'accès Multi-Utilisateurs

Les techniques d'accès multiples permettent à plusieurs utilisateurs d'accéder à la bande passante limitée du spectre de manière efficace [8].

Le spectre disponible étant limité pour les communications sans fil, il est nécessaire de l'attribuer efficacement. Des protocoles de contrôle d'accès au support sont utilisés pour exploiter efficacement la bande passante limitée grâce à des techniques basées sur la réservation et la contention.

Figure 1.3 présente la classification des protocoles de contrôle d'accès au support dans les réseaux radio cognitifs sans fil. **FDMA** (Frequency Division Multiple Access), **TDMA** (Time Division Multiple Access) et **CDMA** (Code Division Multiple Access) sont des protocoles basés sur la réservation, tandis qu'Aloha, Slotted Aloha et CSMA (Carrier Sense Multiple Access) sont des protocoles basés sur la contention.

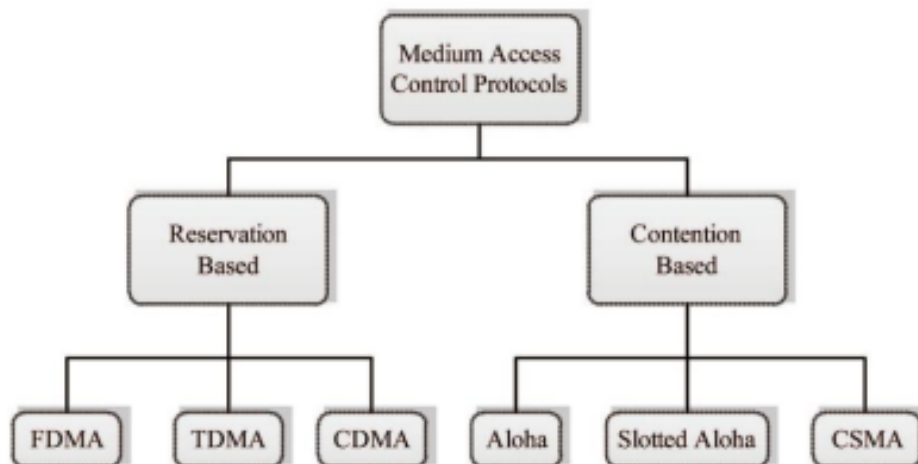


FIGURE 1.5 – Classification des protocoles de contrôle d'accès au support.

### 1.4.1 Accès Multiple à Répartition en Fréquence (FDMA)

La technologie FDMA divise une bande de fréquence en sous-bandes étroites [30], chacune associée à une fréquence porteuse spécifique, utilisée par un seul utilisateur. Des bandes de garde séparent les canaux pour limiter les interférences. Un exemple notable est le système AMPS aux États-Unis, opérant sur les fréquences 824-849 MHz et 869-894 MHz, avec des canaux de 30 kHz.

#### Avantages :

- Augmentation de la capacité grâce à des techniques de codage efficaces et à la réduction du débit.
- Conception simple, adaptée à la qualité de service pour la voix.

#### Limites :

- Peu d'améliorations par rapport aux systèmes analogiques, notamment en termes de capacité.
- Débit fixe et limité par canal, insuffisant pour les services des futurs systèmes mobiles à haut débit.

La Figure 1.6, présente les caractéristiques de la technique d'accès FDMA. Nous distinguons, au niveau de cette figure, un découpage principal de la bande de fréquence en deux parties pour couvrir les liens montant et descendant. Ensuite, un découpage secondaire de ces deux bandes radio en canaux séparés par des bandes de garde.

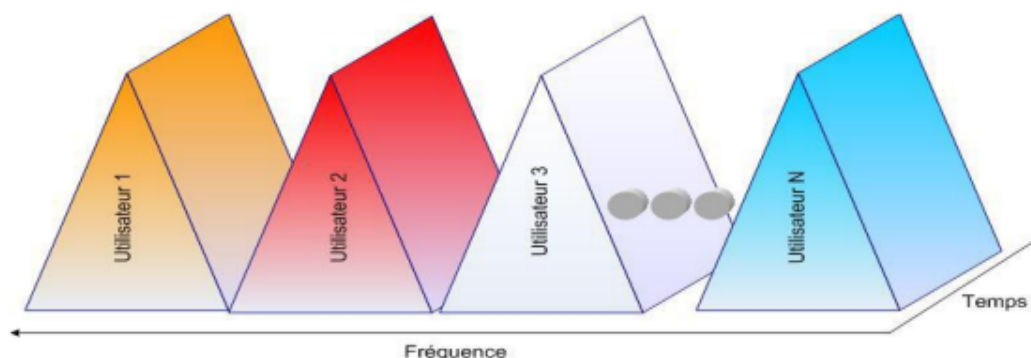


FIGURE 1.6 – Accès multiple à répartition en fréquence (FDMA).

### 1.4.2 Accès Multiple à Répartition dans le Temps (TDMA)

La technique FDMA divise la bande de fréquences pour le partage du spectre entre les usagers, tandis que la technique TDMA (Accès Multiple à Répartition dans le Temps) attribue la totalité de la bande de fréquences à chaque utilisateur pendant un intervalle de temps spécifique, appelé *slot* [30]. Les informations sont stockées par l'émetteur avant d'être transmises dans le *slot* qui lui est dédié. Ces *slots* sont organisés en trames, offrant plusieurs canaux aux utilisateurs. Le récepteur reconstitue ensuite le signal à la vitesse du support.

#### Avantages :

- Flexibilité des débits grâce à l'allocation multiple des canaux et à la synchronisation temporelle, réduisant le coût des terminaux mobiles.
- Découpage du message en trames, améliorant la gestion, le contrôle de débit et la correction d'erreurs.
- Utilisation optimisée du spectre radio, supprimant le besoin de bandes de garde entre les sous-bandes.
- Transmission synchronisée avec des temps de garde appropriés pour assurer la qualité.

#### Limites :

- Exige un pic en puissance lors de la transmission sur le lien montant, ce qui réduit considérablement l'autonomie des terminaux.
- Nécessite une synchronisation précise à la réception pour délimiter les trames et extraire les messages.

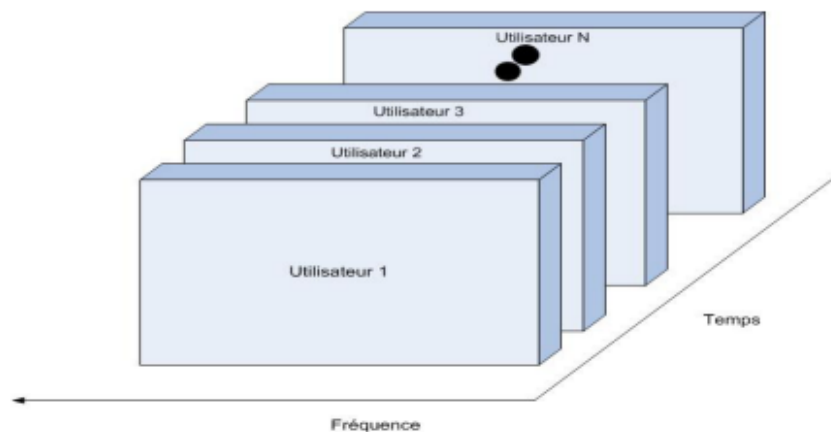


FIGURE 1.7 – Accès multiple à répartition dans le temps TDMA .

Le TDMA s'applique principalement à la transmission de signaux numériques, contrairement au FDMA, conçu pour une transmission analogique. Toutefois, la combinaison des deux techniques est envisageable. La Figure 1.6 illustre une bande de fréquences déjà divisée par le FDMA en sous bandes centrées autour de différentes porteuses. Chaque sous bande est ensuite partagée en slots, suivant la technique TDMA, ce qui permet d'augmenter considérablement le nombre d'utilisateurs dans le réseau [30].

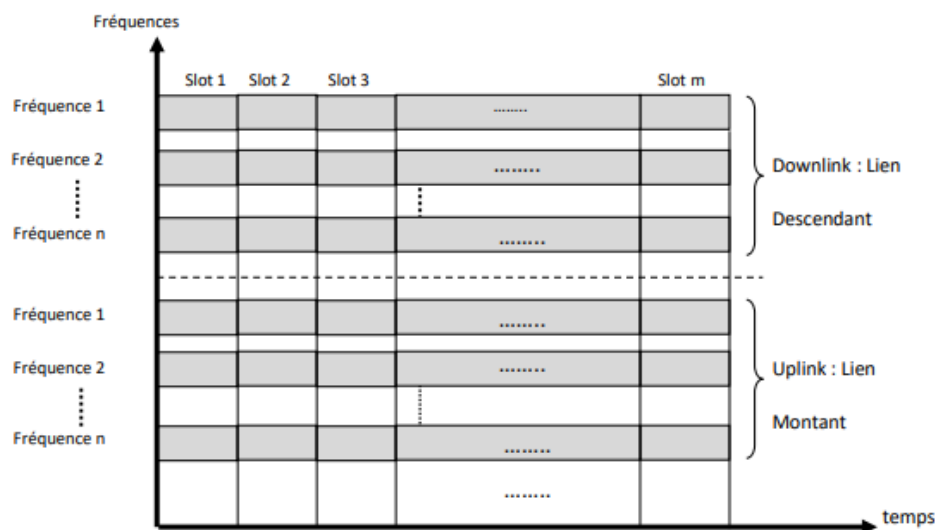


FIGURE 1.8 – Combinaison des deux techniques TDMA et FDMA.

Cette figure illustre aussi la répartition des fréquences ainsi que leur utilisation à travers le temps. Le slot constitue une unité d'allocation exclusive de la bande de fréquence à un usager durant un intervalle de temps. Cette allocation temporelle du canal de communication est effectuée de façon identique sur les liens montant et descendant.

### 1.4.3 Accès Multiple à Répartition de Code (CDMA)

Les systèmes CDMA (Accès Multiple à Répartition de Code), selon les standards IS-95A/JSTD-008, offrent des avantages techniques et économiques. Leur capacité est supérieure à celle des systèmes analogiques ou numériques grâce à des techniques avancées de codage, de modulation, et à la réutilisation complète du spectre dans chaque cellule ou secteur [30].

CDMA permet à tous les utilisateurs d'une cellule d'utiliser simultanément la totalité de la bande de fréquences, en attribuant à chacun un code binaire unique. Ces codes assurent une transmission sans interférence et facilitent la réutilisation des fréquences dans les cellules adjacentes.

La technique repose sur l'étalement de spectre, où le signal est transmis sur une bande plus large :

- L'émetteur combine l'information avec un code spécifique avant transmission.
- Le récepteur utilise le même code, synchronisé avec l'émetteur, pour isoler et reconstruire le signal original, tout en filtrant les interférences des autres utilisateurs.

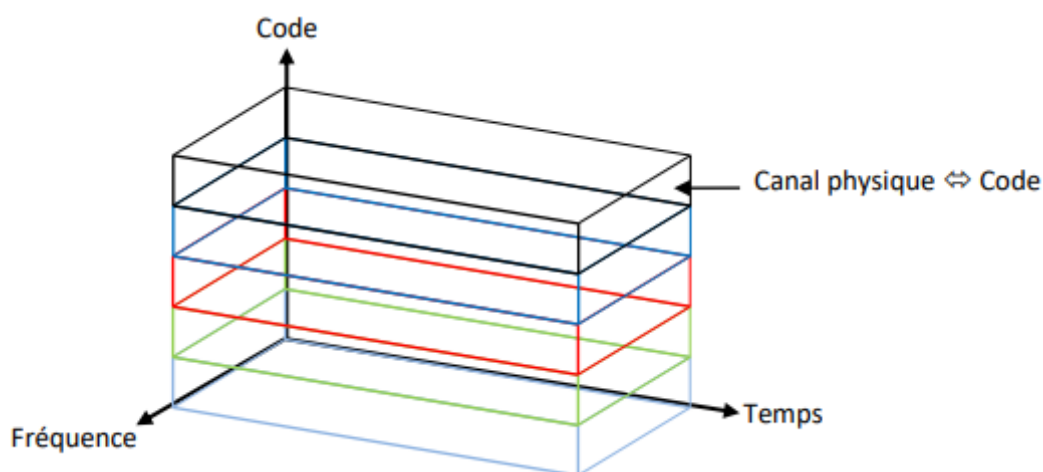


FIGURE 1.9 – Accès Multiple à répartition de code.

Un système CDMA offre une qualité de service robuste en corrigeant les limites du lien radio des systèmes à bandes étroites. Les phénomènes tels que l'atténuation, la dégradation du signal et les procédures de relève répétitives sont efficacement gérés. Par exemple, CDMA élimine l'effet Ping-Pong lors des relèves en établissant une double connexion entre le terminal mobile, la cellule cible, et l'ancienne cellule, ce qui garantit une transition fluide et réduit les blocages d'appels, un facteur clé pour la qualité de service. De plus, cette technologie exploite l'atténuation et la multiplication des chemins de propagation pour améliorer la qualité du signal. Chaque terminal mobile combine les trois signaux les plus puissants pour produire un signal optimisé.

Sur le plan économique, le CDMA se distingue par des coûts réduits. Il ne nécessite pas de réutilisation de fréquences entre cellules, et les terminaux mobiles transmettent avec une puis-

sance moyenne de 6 à 7 mW, bien inférieure à celle requise par le FDMA et le TDMA. Cette faible puissance de transmission prolonge l'autonomie des batteries, offrant ainsi un avantage significatif pour les utilisateurs.

## 1.5 Évolution du TDMA à travers les générations

### 1.5.1 TDMA dans les premières générations cellulaires

Dans les années 1990, l'Europe a largement adopté le TDMA comme technologie d'accès multiple dans le cadre du développement de la 2G, à travers la norme GSM [16]. Le TDMA permettait de diviser chaque fréquence en créneaux temporels, chacun alloué à un utilisateur, ce qui permettait une gestion efficace de la voix et des SMS dans un contexte encore dominé par la communication vocale. Ce système, bien que révolutionnaire à l'époque, avait ses limites : inflexibilité dans l'allocation des ressources, et inadéquation face aux besoins émergents en données. Ces limitations ont motivé le développement de la 3G, qui a introduit le CDMA, une technologie plus flexible qui permet à tous les utilisateurs de transmettre simultanément sur la même fréquence grâce à des codes d'étalement uniques. Le CDMA a permis une meilleure efficacité spectrale, une résistance accrue aux interférences, et surtout, une prise en charge plus robuste des données mobiles, devenues essentielles avec la croissance d'Internet mobile. Néanmoins, avec la vague de l'utilisation du haut débit, le CDMA a également démontré ses limites. La 4G, notamment via la norme LTE, a alors adopté une nouvelle approche avec l'OFDMA. Cette technologie divise la bande passante en multiples sous-porteuses orthogonales, attribuables dynamiquement à chaque utilisateur, ce qui maximise à la fois la flexibilité, la capacité réseau et la qualité de service. L'OFDMA surpasse les techniques précédentes (TDMA et CDMA) en permettant une gestion fine et dynamique des ressources radio, essentielle pour supporter des usages variés comme le streaming vidéo, les applications en temps réel ou l'Internet des objets.

### 1.5.2 Transition vers la 5G

Avec l'arrivée de la 5G, les réseaux mobiles doivent faire face à des exigences inédites en matière de performance, de fiabilité et de densité de connexions. L'Union Internationale des Télécommunications (UIT) identifie trois grands cas d'usage : l'eMBB pour les très hauts débits, le mMTC pour la connectivité massive des objets, et l'URLLC pour les applications critiques nécessitant une très faible latence [16]. Ces exigences émergentes ont exposé les limites des techniques d'accès orthogonales comme l'OFDMA, employées en 4G, en particulier en termes d'efficacité spectrale et de gestion de l'interférence dans des zones densément peuplées. Pour résoudre ce problème, la 5G utilise des approches non orthogonales, le Noma étant l'une d'entre elles, qui superpose les signaux de plusieurs utilisateurs sur les mêmes ressources temps-fréquence et utilise la technique de Successive Interference Cancellation (SIC) pour les séparer. Si cette approche améliore l'efficacité spectrale, elle reste complexe et sensible aux erreurs. C'est pourquoi de nouvelles techniques telles que la RSMA émergent. Plus flexible, le RSMA divise chaque message en une partie commune et une partie privée, permettant une gestion intelligente et adaptative de l'interférence. Il s'aligne parfaitement avec les systèmes multid-

mensionnels et peut s'adapter à divers environnements, ce qui en fait un candidat prometteur pour les réseaux 5G et futurs. Cette progression démontre le passage modèles d'accès fixes et perpendiculaires aux techniques dynamiques, adaptatives et intelligentes, qui sont désormais en mesure de répondre aux demandes croissantes de la communication mobile contemporaine.

## 1.6 Gestion Dynamique de l'Accès des SUs dans un Réseau à Radio Cognitive utilisant le Protocole TDMA

Dans un réseau à radio cognitive utilisant le protocole TDMA, les utilisateurs secondaires (SUs) doivent d'abord établir une connexion avec la station de base secondaire (CR-BS) avant de pouvoir participer au processus de communication [17, 28]. Ce processus d'accès s'ajuste en fonction des actions des utilisateurs principaux (PUs), qui ont une priorité d'accès au spectre radioélectrique. Dans ce cadre, les ressources temporelles sont partagées entre les utilisateurs secondaires, chaque utilisateur étant assigné à un créneau temporel distinct.

Afin de simuler le comportement adaptatif de ce système, plusieurs états fonctionnels sont définis [28]. Ces états permettent au système de gérer les demandes d'accès des SUs en fonction de la disponibilité des créneaux temporels et du nombre d'utilisateurs secondaires présents. Les différents états sont :

- **État de vacance** : Cet état correspond à une situation où le canal est entièrement occupé par les PUs. Aucune disponibilité de ressource spectrale pour les SUs, ce qui empêche toute tentative d'accès. Le système reste dans cet état jusqu'à la libération d'au moins une bande de fréquence .
- **État de retard** : Dès qu'un ou plusieurs créneaux temporels deviennent disponibles, la station de base entre dans un état d'attente, appelé "état de retard". Dans cet état, le serveur attend l'accumulation d'un nombre minimal de SUs (noté  $a$ ) avant de démarrer le processus d'accès. Ce processus vise à optimiser l'utilisation des ressources spectrale .
- **État de basculement** : Si le nombres d'utilisateurs atteint  $a - 1$  SUs (en dessous du seuil requis qui est de  $a$  SUs), le système passe dans un état critique temporaire, appelé état de basculement. Dans cet état, un délai supplémentaire est accordé pour permettre l'arrivée d'un dernier utilisateur secondaire (SU). Si un client arrive à temps, le seuil  $a$  est atteint, et le service démarre normalement.  
En revanche, si aucun SU n'arrive pendant ce délai, le serveur n'entre pas en vacance, mais envoie à la place une trame vide. Cette stratégie permet d'éviter une attente inutile tout en maintenant la cadence du protocole TDMA. Une fois cette trame vide transmise, le système retourne à l'état de retard et attend à nouveau l'accumulation d'un minimum de  $a$  clients avant de relancer un cycle de service.
- **État occupé** : Lorsque le nombre de SUs atteint ou dépasse le seuil requis ( $\geq a$ ), le système passe en état "occupé". Le serveur devient actif et attribue dynamiquement des créneaux temporels aux SUs en file d'attente.

## 1.7 Nœuds malicieux

### 1.7.1 Définition

Les utilisateurs secondaires (US) peuvent accéder dynamiquement aux ressources spectrales que les utilisateurs principaux (UP) n'utilisent pas dans un réseau radio cognitif . Cependant, cette ouverture introduit une vulnérabilité majeure : certains SUs peuvent adopter un comportement malicieux en transmettant volontairement de fausses informations sur l'état du spectre. Ces SUs malicieux sont appelés nœuds malicieux.

Leur objectif est de perturber la décision du centre de fusion (FC) [1], souvent en falsifiant les données de détection du spectre. Ce type d'attaque est connu sous le nom de SSDF (Spectrum Sensing Data Falsification). Elle peut entraîner :

- l'attribution erronée de canaux aux SUs, provoquant des interférences avec les PUs,
- une sous-utilisation du spectre,
- une consommation inutile d'énergie due à des retransmissions ou à des décisions incorrectes.

### 1.7.2 Gestion des SUs malicieux par le TDMA

Le protocole TDMA est intégré dans le modèle pour organiser les transmissions des SUs vers le FC [1]. Chaque SU se voit attribuer un créneau temporel exclusif, ce qui permet une transmission ordonnée et sans interférence directe entre utilisateurs.

Le TDMA apporte plusieurs avantages concrets dans la détection et la gestion des SUs malicieux :

1. **Transmission contrôlée et traçable** : En assignant un slot fixe à chaque SU, le FC peut facilement identifier quel SU a transmis un rapport falsifié.
2. **Réduction des collisions** : Les transmissions étant séquentielles, toute perturbation peut être associée à un slot spécifique.
3. **Synchronisation renforcée avec le FC** : Cela facilite la surveillance des comportements suspects dans le temps.

## 1.8 Domaines d'application

- **Optimisation des réseaux mobiles** :Grâce à l'intégration du TDMA dans les réseaux radio cognitifs, une gestion efficace des ressources spectrales est obtenue, permettant une planification dynamique des créneaux horaires pour les utilisateurs en fonction des demandes. Cela améliore la **qualité de service (QoS)** et réduit les interférences dans les réseaux cellulaires 4G, 5G et au-delà.
- **Optimisation des réseaux mobiles** :Grâce à l'intégration du TDMA dans les réseaux radio cognitifs, une gestion efficace des ressources spectrales est obtenue, permettant une planification dynamique des créneaux horaires pour les utilisateurs en fonction des demandes. Cela améliore la **qualité de service (QoS)** et réduit les interférences dans les réseaux cellulaires 4G, 5G et au-delà.
- **Communications critiques et d'urgence** : Dans les situations de catastrophe ou d'urgence, le TDMA appliqué à la radio cognitive permet aux services de secours (pompiers, ambulances, police) d'obtenir des créneaux de communication garantis, même en présence d'un trafic réseau élevé ou d'une infrastructure endommagée.
- **Réseaux de capteurs intelligents (IoT et WSN)** :Le TDMA est utilisé pour planifier les transmissions des nœuds de **capteurs sans fil intelligents** dans des applications telles que la surveillance environnementale, les réseaux industriels et les villes intelligentes. En attribuant à chaque capteur des créneaux horaires spécifiques, cela réduit la consommation d'énergie et minimise les conflits de transmission.
- **Communications militaires sécurisées** :Dans un environnement militaire, la radio cognitive exploitant le TDMA permet de **sécuriser les communications tactiques** en évitant les fréquences utilisées par l'ennemi ou en trouvant dynamiquement des créneaux libres. afin de garantir des échanges d'informations rapides et fiables sur le champ de bataille.
- **Réseaux satellitaires et aérospatiaux** : L'application du TDMA dans les systèmes de communication par satellite et réseaux aériens pour synchroniser les transmissions entre plusieurs terminaux sans interférence. Son intégration dans la radio cognitive permet une gestion adaptative du spectre en fonction de la disponibilité des fréquences.

## 1.9 Position du Problème

Le développement rapide des technologies de communication sans fil a profondément changé notre quotidien, en s'appuyant sur une ressource précieuse mais limitée : le spectre radio. Pourtant, même si la demande ne cesse de croître, des études montrent que ce spectre est loin d'être utilisé pleinement. Car : une gestion inefficace, où des bandes de fréquences sont attribuées de manière fixe aux (PU), sans vraiment tenir compte de leur utilisation réelle. Résultat : certaines fréquences sont surchargées, tandis que d'autres restent inutilisées pendant de longues périodes.

La radio cognitive offre une solution innovante pour remédier à cette inefficacité. Elle permet aux appareils sans fil dits utilisateurs secondaires de repérer en temps réel les fréquences non utilisées et de les exploiter, sans gêner les utilisateurs primaires. Mais cette approche soulève un défi important : réussir à faire cohabiter ces deux types d'utilisateurs de manière harmonieuse, en garantissant une utilisation efficace du spectre tout en respectant la priorité des utilisateurs primaires.

Dans cette logique, le protocole TDMA (Time Division Multiple Access) est souvent utilisé dans la radio cognitive pour organiser l'accès au spectre par les utilisateurs secondaires. Il permet de diviser le temps en créneaux horaires, attribués dynamiquement, ce qui facilite la coordination entre les transmissions opportunistes des SUs et la présence prioritaire des PUs, tout en réduisant les interférences.

C'est dans ce contexte que notre travail se situe : il se concentre sur l'analyse et l'optimisation de la coordination entre les (PUs) et les (SUs) dans un environnement de (RC). Plus précisément, nous cherchons à comprendre comment cette coordination influence la performance du système, en termes de QoS pour les SU. À l'aide d'une applications numériques.

## **1.10 Conclusion**

L'intégration du protocole TDMA dans un cadre radio cognitive nous offre une solution efficace au traitement de gestion de l'accès commun au spectre radioélectrique. En attribuant à chaque utilisateur secondaire un créneau temporel réservé, ce mécanisme nous permet de réduire les risques de collision et d'optimiser l'utilisation globale du spectre. Cette méthode privilégie un meilleur contrôle coopératif des utilisateurs secondaires et nous aide à restreindre les interférences avec les utilisateurs primaires. Par conséquent, le TDMA est pour nous un levier prometteur pour optimiser la transmission sans fil dans les réseaux radio cognitive, en renforçant la (QoS) et la stabilité des communications.

# 2

## Les files d'attente

### Introduction

Les files d'attente constituent pour nous un outil de modélisation essentiel, nous permettant de représenter et d'analyser des situations dans lesquelles plusieurs entités doivent partager une même ressource. Grâce à cet outil mathématique, nous sommes en mesure d'évaluer les performances d'un système confronté à de la congestion, d'en améliorer la gestion et d'anticiper les effets liés aux variations de charge. Cette approche est adoptée dans de nombreux domaines, tels que les réseaux de communication, les systèmes informatiques ou encore la logistique [7].

Dans le contexte des systèmes de communication, la théorie des files d'attente nous offre un cadre pertinent pour étudier les protocoles d'accès aux canaux partagés, comme le TDMA. Ce protocole repose sur un découpage temporel, permettant à chaque utilisateur de transmettre à tour de rôle, ce qui engendre naturellement des files d'attente. En modélisant ce comportement, nous pouvons mieux comprendre les performances du TDMA et chercher à les optimiser.

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>19</b>
<b>2.1 Caractéristiques</b> . . . . .	<b>20</b>
<b>2.2 Notion de classe de clients</b> . . . . .	<b>21</b>
<b>2.3 Notations de Kendall</b> . . . . .	<b>21</b>
<b>2.4 Formule de Little</b> . . . . .	<b>22</b>
<b>2.5 Types de modèle</b> . . . . .	<b>22</b>
<b>2.6 Vacances dans le système de files d'attente</b> . . . . .	<b>23</b>
<b>2.7 Système de files d'attente avec vacance unique et vacances multiples</b> . . . . .	<b>24</b>
<b>2.8 Conclusion</b> . . . . .	<b>25</b>

---

## 2.1 Caractéristiques

[27] On parle de files d'attente lorsque des individus ou des éléments, appelés clients, se présentent dans un système pour obtenir un service et doivent patienter avant d'être pris en charge par un ou plusieurs serveurs. L'ordre dans lequel ces clients sont servis dépend d'une règle de gestion spécifique.

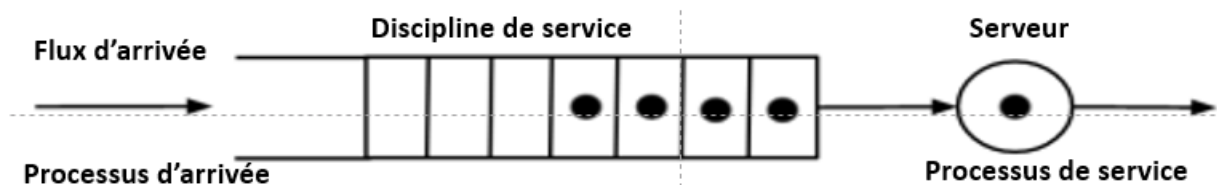


FIGURE 2.1 – Représentation d'une de file d'attente simple.

### 2.1.1 Flux d'arrivée

Les systèmes de file d'attente sont pratiquement inévitables chaque fois qu'il s'agit du taux d'arrivée des clients. En général, les arrivées aux systèmes de file d'attente peuvent être déterministes ou aléatoires, dépendants ou indépendants, individuels ou en groupe, et homogènes ou hétérogènes. À cet égard, le processus de Poisson est principalement utilisé pour décrire les processus d'arrivée dans les systèmes de file d'attente.

### 2.1.2 Serveur

le flux d'arrivée séjourne encore dans un dispositif appelé serveur qui fournit le service demandé. Le temps de service peut être décrit par une loi de probabilité, ou bien être déterminé au départ. Plusieurs facteurs influent sur le temps de service : le nombre de serveurs, le type de dispositions, la classe de clients si la population est hétérogène, le moment de la journée, etc. La distribution du temps de service la plus utilisée est la distribution exponentielle.

### 2.1.3 Discipline de service

La discipline de service quant à elle est la méthode de sélection du prochain client lorsque le serveur a fini son service du client courant. Un certain nombre de disciplines existent :

- **Premier arrivé, premier servi (First Come, First Served - FCFS) ou Premier entré, premier sorti (First In, First Out - FIFO)** : Cette méthode respecte l'ordre d'arrivée des clients et est couramment utilisée lorsqu'il y a un seul serveur.
- **Dernier arrivé, premier servi (Last In, First Out - LIFO)** : Le dernier client arrivé est servi en premier. Cette approche est souvent appliquée dans la gestion des stocks suivant un système de pile : celui qui vient le plus tard repart le plus tôt.

- **Priorité** : Les clients sont servis en fonction de leur importance. Une personne prioritaire sera servie avant une personne non prioritaire, même si elle est arrivée avant. Cela est fréquent dans les services d'urgence, les aéroports, etc.
- **Aléatoire** : Le choix du client à servir se fait de manière aléatoire.

## 2.2 Notion de classe de clients

Une population peut être composée de plusieurs types d'utilisateurs, qui se distinguent par leur classe. Chaque classe a alors son processus d'arrivée, son processus de service et son ordre de service. Lorsque ces classes ont été identifiées, la discipline générale du service est la discipline avec priorités.

Deux situations, non exhaustives, sont alors à traiter :

- **Système non préemptif** : Le service du client non prioritaire se poursuit jusqu'à son terme avant de traiter un client prioritaire. Par exemple, dans les hôpitaux et les urgences, une intervention chirurgicale entamée doit être terminée avant de traiter un autre cas, même plus urgent.
- **Système préemptif** : Le service du client non prioritaire est interrompu lorsqu'un client prioritaire arrive. Il reprend lorsque le traitement du client prioritaire est terminé et s'il n'y a plus de personnes prioritaires dans la file. C'est le cas dans certaines situations où les femmes enceintes et les personnes handicapées sont prioritaires.

## 2.3 Notations de Kendall

[22] David George Kendall a créé une notation pour décrire un système de file d'attente. La nomenclature générale d'une file d'attente en utilisant cette notation est de la forme :

- **A** : Processus d'arrivée des clients (distribution d'inter-arrivée).
- **B** : Schéma de service (distribution de durée de service des clients).
- **m** : Nombre de serveurs.
- **K** : Capacité maximale de la file d'attente.
- **N** : Nombre de clients utilisant le système.
- **Z** : Discipline du système qui décrit la façon dont les clients sont ordonnés.

Pour les arrivées et les services, on utilise les symboles suivants :

- **M** : Loi exponentielle.
- **D** : Loi déterministe.
- **G** : Loi générale.
- **H<sub>k</sub>** : Loi hyperexponentielle d'ordre  $k$ .
- **E<sub>k</sub>** : Loi d'Erlang d'ordre  $k$ .

Le nombre de serveurs peut varier de 1 à l'infini (noté  $\infty$ ), de même pour  $K$  et  $N$ .

Lorsque les deux derniers éléments de la notation de Kendall ne sont pas précisés, il est sous-entendu que :  $K = \infty$  et  $Z = \text{FIFO}$  (Premier arrivé, premier servi).

## 2.4 Formule de Little

[25] La formule de Little, démontrée par l'auteur éponyme, constitue l'un des résultats les plus élégants et les plus puissants de la théorie des files d'attente. Elle se distingue tant par sa simplicité que par sa grande portée.

Cette formule établit un lien fondamental entre le temps moyen passé par un client dans le système (ou dans la file d'attente) et le nombre moyen de clients présents. Elle permet ainsi de faciliter de nombreux calculs de performance.

Il est important de noter que cette relation n'est valide que dans le cadre de systèmes stables, c'est-à-dire des systèmes dans lesquels un équilibre stochastique s'est établi, assurant un fonctionnement stationnaire.

**Théorème 1.4.1.** *La relation entre le nombre moyen de clients présents dans le système et le temps moyen de séjour d'un client dans ce même système est donnée par la formule suivante :*

$$L = \lambda_e W, \quad \lambda_e < \lambda. \quad (2.1)$$

Ici,  $\lambda_e$  désigne le taux effectif d'arrivée dans le système. Une relation similaire permet de relier le nombre moyen de clients dans la file d'attente au temps moyen d'attente :

$$L_q = \lambda_e W_q, \quad \lambda_e < \lambda. \quad (2.2)$$

**Remarque 1.4.1.** *Dans le cas où la capacité du système est infinie, on a alors  $\lambda_e = \lambda$ .*

Par ailleurs, d'autres relations utiles peuvent être établies, exprimant les quantités globales à partir des valeurs associées à la file d'attente :

$$\begin{cases} L = L_q + \frac{\lambda_e}{\mu}, \\ W = W_q + \frac{1}{\mu}. \end{cases}$$

## 2.5 Types de modèle

La modélisation des files d'attente peut prendre plusieurs formes selon la nature et le comportement du système étudié. À ce titre, on distingue principalement deux grandes catégories de modélisation : les modèles markoviens et les modèles non markoviens.

### 2.5.1 Modèles markoviens

[3] Les files d'attente Markoviennes sont celles pour lesquelles les deux quantités, soit les inter-arrivées et le service, peuvent être supposées exponentielles. Cette organisation des files d'attente est caractérisée par le processus  $\{N(t), t \geq 0\}$ , qui représente le nombre de clients dans le système à l'instant  $t$  et est de naissance et de mort.

La forme la plus simple de distribution du temps de service est la distribution exponentielle. Toutefois, la propriété du "sans mémoire" de la loi exponentielle rend habituellement ce modèle peu réaliste pour représenter les phénomènes réels. Ainsi, d'autres formes de distributions sont nécessaires, ce qui conduit à des files d'attente non Markoviennes.

### 2.5.2 Modèles non markoviens

Lorsqu'on s'affranchit de l'hypothèse d'exponentialité pour le temps entre les arrivées ou la durée du service, ou lorsque des paramètres supplémentaires sont introduits pour mieux modéliser certaines spécificités du système, le processus résultant devient non markovien. L'analyse de tels modèles étant souvent complexe, voire intractable, il est courant d'adopter des techniques permettant de les reformuler sous une forme markovienne afin de faciliter leur étude [2][6].

Parmi les méthodes les plus utilisées, on distingue :

- **la méthode de la chaîne de Markov induite** : Introduite par Kendall [22], cette approche consiste à sélectionner une suite d'instantanés spécifiques (déterministes ou aléatoires) de manière à ce que la chaîne discrète obtenue  $\{X_n, n \geq 0\}$ , où  $X_n$  représente l'état du système à ces instantanés, soit markovienne et homogène.
- **La méthode des variables auxiliaires** : Elle repose sur l'ajout de variables supplémentaires permettant d'enrichir la description du processus  $\{X(t), t \geq 0\}$ , de sorte que l'ensemble étendu  $\{X(t), A(t_1), A(t_2), \dots, A(t_n)\}$  satisfasse les propriétés d'un processus de Markov.
- **La méthode des événements fictifs** : Cette technique consiste à introduire des événements artificiels afin d'établir une correspondance probabiliste entre le système étudié et certaines fonctions mathématiques, telles que les transformées de Laplace des variables aléatoires qui le caractérisent.

D'autres approches existent pour l'analyse des systèmes non markoviens, notamment les méthodes basées sur la théorie des martingales et diverses techniques d'approximation.

## 2.6 Vacances dans le système de files d'attente

les serveurs peuvent ne plus être disponibles pendant un certain temps pour diverses raisons. Cette période d'absence du serveur peut signifier que le serveur travaille sur certaines tâches supplémentaires, pour analyser ces systèmes, nous introduisons les vacances de service dans les modèles de files d'attente afin de représenter la période d'absence temporaire du serveur

et ça rend les modèles de file d'attente plus réalistes et plus flexibles. Depuis que l'idée a été discutée pour la première fois dans l'article de Levy et Yechiali [24]

## 2.7 Système de files d'attente avec vacance unique et vacances multiples

Un système de files d'attente avec vacances est un système dans lequel un serveur peut devenir indisponible pendant une période aléatoire à partir d'un centre de service principal. Le temps passé loin du centre de service principal s'appelle des vacances et peut être le résultat de nombreux facteurs. Dans certains cas, les vacances peuvent résulter d'une panne du serveur, ce qui signifie que le système doit être réparé et remis en service. Il peut également s'agir d'une action de libéré le serveur pour l'utiliser dans un centre de service secondaire lorsqu'il n'y a aucun client présent dans le centre de service principal. Ainsi, les vacances de serveur sont utiles pour les systèmes dans lesquels le serveur souhaite utiliser son temps d'inactivité à différentes fins, ce qui permet d'appliquer le modèle de files d'attente à une variété de systèmes de service stochastiques du monde réel.

### 2.7.1 Système de files d'attente avec vacance unique

Vacances unique : à la fin de chaque période de service, le serveur passe en vacances et revient immédiatement après la fin des vacances, même si le système est vide. Dans ce cas là il devient inactif jusqu'à l'arrivée d'un client. Le client est servi dès son arrivée. Par exemple, la maintenance des machines dans un processus de production est considérée comme une vacance unique.

### 2.7.2 Système de files d'attente avec vacances multiples

Vacances multiples : le serveur prend des vacances à chaque fois que le système devient vide. Si le serveur revient de vacances et trouve un système non vide, il démarre immédiatement le service et continue jusqu'à ce que le système devienne vide (service exhaustif). Si le serveur revient de vacances pour retrouver un système vide, il commence immédiatement une autre vacance et continue jusqu'à ce qu'il trouve un ou plusieurs clients à son retour.

Il existe différents types de systèmes de files d'attente avec vacances, selon la politique de service :

- La politique de service exhaustif, le serveur servira tous les clients en attente ainsi que ceux qui arrivent pendant qu'il sert encore. Il prend une autre vacance lorsque la file d'attente est vide.
- La politique de service bloqué, le serveur ne servira que les clients qu'il trouvera dans la file d'attente à son retour de vacances. À la fin de leur service, le serveur commencera une autre vacance et tous les clients qui arriveraient alors que le serveur servait déjà à la station seront servis au retour du serveur.
- La stratégie de service limité, le serveur ne servira qu'un nombre maximum prédéfini de clients, puis commencera par une autre vacance. Le programme de service de vacance

---

unique dans lequel un seul client est servi est un type spécial de cette stratégie.

## **2.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié les notions fondamentales des files d'attente, leurs caractéristiques et leur classification. Nous avons présenté différents types de modèles, notamment ceux intégrant des périodes de vacances, afin de mieux représenter des systèmes réels. Cette base théorique nous servira dans la modélisation des protocoles de communication, notamment pour analyser les performances du TDMA dans un contexte de radio cognitive.

# 3

## État de l'art sur quelques travaux modélisant le protocole TDMA

### Introduction

La modélisation des protocoles d'accès multiple constitue un domaine essentiel dans l'étude des réseaux sans fil, en particulier dans le contexte de la radio cognitive. Dans ce chapitre, nous présentons un panorama synthétique et structuré des travaux existants portant sur la modélisation et l'analyse des protocoles d'accès multiple, en nous concentrant plus particulièrement sur le protocole TDMA appliqué aux réseaux de radio cognitive. Nous mettons en évidence les approches de modélisation mathématique adoptées dans la littérature, notamment celles basées sur (les chaînes de Markov, les systèmes de files d'attente, et la Théorie des jeux ...).

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>26</b>
<b>3.1 Sécurité et gestion de l'énergie dans les réseaux cognitifs WSNs via théorie des jeux</b> . . . . .	<b>27</b>
<b>3.2 Modélisation Mathématique du TDMA dans les Réseaux Satellitaires</b> . . . . .	<b>27</b>
<b>3.3 Ordonnancement décentralisé TDMA au niveau de la couche MAC dans les réseaux maillés radio cognitifs</b> . . . . .	<b>28</b>
<b>3.4 Modélisation du protocole TDMA par files d'attente pour la gestion de la QoS dans les RCSF</b> . . . . .	<b>28</b>
<b>3.5 Transmission vidéo sur réseaux radio cognitifs TDMA sous contraintes de collisions</b> . . . . .	<b>29</b>
<b>3.6 Analyse des Performances des Systèmes OFDM-TDMA par la Théorie des Files d'Attente</b> . . . . .	<b>29</b>

<b>3.7 Modélisation analytique des performances dans les réseaux maillés TDMA sans collision</b> . . . . .	<b>30</b>
<b>3.8 Optimisation de l'Accès Temporel au Canal dans un Réseau WSN par Théorie des Graphes</b> . . . . .	<b>30</b>
<b>3.9 Contrôle de transmission dans les réseaux de radio cognitive</b> . . . . .	<b>30</b>
<b>3.10 Conception croisée et routage géographique dans les réseaux radio cognitifs ad hoc</b> . . . . .	<b>31</b>
<b>3.11 Conclusion</b> . . . . .	<b>31</b>

## 3.1 Sécurité et gestion de l'énergie dans les réseaux cognitifs WSNs via théorie des jeux

Dans cet article, Mohamed S. Abdalzaher et Osamu Muta [1] proposent une approche combinant la théorie des jeux de Stackelberg et le protocole TDMA dans les (RCSF) appliqués à la radio cognitive, afin de renforcer la sécurité et de réduire la consommation d'énergie. L'objectif principal est de protéger la transmission des rapports vers le centre de fusion face aux attaques de falsification des données de détection du spectre. L'utilisation d'un détecteur à filtre adapté (Matched Filter) couplée à une organisation des transmissions par TDMA permet également de limiter les collisions et d'optimiser la dépense énergétique.

L'approche mathématique qui a été utilisée permet de modéliser la confrontation entre le centre de fusion et un attaquant, rendant possible une adaptation dynamique des stratégies de défense selon le comportement de l'adversaire. Par conséquent, cette approche permet de préserver jusqu'à 83% des rapports lors d'une attaque, tout en réduisant significativement la consommation énergétique du réseau. Les résultats obtenus soulignent ainsi l'efficacité des mécanismes intelligents de protection, indispensables pour garantir la robustesse et la longévité des réseaux sans fil de nouvelle génération.

## 3.2 Modélisation Mathématique du TDMA dans les Réseaux Satellitaires

Les auteurs analysent les performances de TDMA dans les réseaux satellitaires en orbite basse à l'aide d'un modèle de file d'attente M/D/1 [19]. Dans ce modèle, les arrivées de trafic sont modélisées par un processus de Poisson, le temps de service est déterministe et chaque utilisateur disposant d'un slot de temps fixe et un canal unique est partagé entre tous les utilisateurs.

Cette approche permet aux auteurs de déterminer les délais d'attente causés par la structure en trames du TDMA, d'analyser l'effet des temps de garde utilisés pour la synchronisation des transmissions, et de comparer les performances de ce protocole à celles d'autres méthodes d'accès multiple, telles que le CDMA .

Les résultats montrent que, bien que le TDMA offre une bonne efficacité spectrale et facilite une gestion centralisée des ressources, avec une latence acceptable, surtout dans des environne-

ments dynamiques. cette étude souligne la nécessité d'optimiser l'allocation des slots temporels et la réduction des temps de garde pour améliorer la (QoS) , en particulier pour les applications sensibles aux délais, telles que la voix.

### **3.3 Ordonnement décentralisé TDMA au niveau de la couche MAC dans les réseaux maillés radio cognitifs**

Les auteurs présentent une méthode de planification décentralisée de l'accès TDMA dans les réseaux maillés cognitifs [26], fondée sur l'ordonnement distribué et la théorie des graphes. En utilisant une coloration à deux sauts des nœuds, l'algorithme permet une exécution parallèle de la planification, réduisant le temps d'ordonnement et le volume de messages de contrôle. Le réseau est structuré sous forme de trames TDMA comportant une phase de contrôle (mini-slots par couleur) et une phase de données. La modélisation mathématique assure l'absence d'interférences et une affectation unique canal/temps pour chaque lien actif. Les résultats de simulation montrent que cette approche améliore la scalabilité, le débit utile, et l'efficacité d'utilisation du spectre, tout en conservant un bon compromis sur la longueur des plannings comparé à une approche par rangs centralisée.

### **3.4 Modélisation du protocole TDMA par files d'attente pour la gestion de la QoS dans les RCSF**

Dans cet article, les auteurs ont suggéré une gestion du médium basée sur le TDMA [11], intégrée dans une architecture Cross-layer, afin d'assurer un accès équitable et structuré au canal dans les réseaux de capteurs sans fil . Ce découpage temporel permet d'éliminer les collisions, de réduire la consommation d'énergie et de prioriser les flux en fonction de leur criticité. Chaque nœud reçoit un créneau horaire dans une trame. assignée par le cluster head , garantissant ainsi une communication fluide et organisée.

La modélisation repose sur des files d'attente multi-classes, représentant différents niveaux de priorité tels que EF (flux en temps réel), AF1, AF2 et AF3. Chaque file suit un modèle M/G/1 avec des arrivées de type poissonien , tandis que les temps de service dépendent de la durée des créneaux TDMA. Cette approche permet aux auteurs d'analyser plusieurs indicateurs comme le temps moyen de séjour, le taux de perte et l'occupation des files.

Les résultats obtenus révèlent que, même si une allocation fixe des créneaux assure une certaine stabilité, elle entraîne un délai constant, particulièrement pénalisant pour les flux à faible priorité. Toutefois, grâce à une différenciation des flux et une planification efficace, les performances pour les données critiques restent satisfaisantes, mettant ainsi en évidence la pertinence du couplage entre TDMA et files d'attente pour garantir la qualité de service dans les (RCSF).

### 3.5 Transmission vidéo sur réseaux radio cognitifs TDMA sous contraintes de collisions

Les auteurs ont développé un modèle mathématique pour but d'évaluer les performances d'un réseau TDMA fonctionnant dans un environnement Cognitive Radio (CR) [12], en intégrant deux sources principales d'erreur : les interférences primaires (retour des utilisateurs sous licence) et les collisions secondaires (transmissions simultanées entre utilisateurs opportunistes).

Cette approche repose sur des outils probabilistes, notamment une loi binomiale pour modéliser l'apparition aléatoire des utilisateurs primaires, ainsi que sur une modélisation des collisions entre utilisateurs secondaires en fonction de leur comportement d'accès (probabilités d'émission dans différents slots).

Pour compenser les pertes de paquets, les auteurs utilisent une approche mixte de codage source/canal, pour but de combiner un encodage progressif (SPIHT) avec des codes LT (Luby Transform), pour être en mesure de corriger les pertes sans coordination préalable. Des formules analytiques sont proposées pour calculer le taux de réussite de transmission (Goodput), selon le niveau de redondance, le nombre de sous-canaux, et les probabilités de collision.

Les résultats montrent qu'une optimisation conjointe des paramètres TDMA (slots, redondance, probabilités d'accès) Cela permet d'améliorer nettement la qualité vidéo tout en utilisant le spectre radio de manière plus efficace. Cette modélisation valorise le rôle des mathématiques appliquées dans la conception de réseaux sans fil robustes et adaptatifs.

### 3.6 Analyse des Performances des Systèmes OFDM-TDMA par la Théorie des Files d'Attente

Les auteurs ont utilisé les files d'attente pour évaluer les performances d'un système sans fil combinant les techniques OFDM avec TDMA[13]. Ce travail permet de représenter mathématiquement la gestion du canal partagé, les délais de transmission ainsi que l'impact de la qualité du signal sur le débit.

Le modèle repose sur une chaîne de Markov à temps discret et sur une estimation non paramétrique du trafic réseau à l'aide de la méthode des noyaux. Contrairement au modèle de Poisson, cette approche prend en compte les irrégularités du trafic réel.

Dans le système étudié, chaque utilisateur transmet ses paquets dans un créneau temporel dédié (TDMA) sur plusieurs sous-porteuses (OFDM), selon une planification cyclique. Ce mécanisme induit un délai d'attente entre les transmissions.

Les résultats obtenus indiquent que l'augmentation du rapport signal sur bruit (SNR) réduit les files d'attente, améliore le débit et diminue la probabilité de débordement du buffer. autrement dit, cette approche met en évidence l'intérêt de l'utilisation des files d'attente pour analyser les performances et optimiser la (QOS) dans les réseaux multi-utilisateurs.

### **3.7 Modélisation analytique des performances dans les réseaux maillés TDMA sans collision**

Dans cet article [21], Florian Kauer et Volker Turau développent un modèle analytique pour évaluer les performances des réseaux maillés sans fil utilisant un accès TDMA sans collision, notamment avec le protocole TSCH de la norme IEEE 802.15.4. En modélisant les files d'attente finies de chaque nœud par une chaîne de Markov, le modèle permet de calculer précisément le taux de livraison des paquets, la latence et le débit dans des réseaux multi-sauts. Il prend en compte l'irrégularité des plannings et la distribution du trafic. Les résultats montrent que l'adaptation du planning aux charges de trafic améliore nettement les performances. Le modèle est validé par simulation (Orchestra/COOJA) et deux algorithmes de planification "traffic-aware" sont proposés pour optimiser le rendement du réseau.

### **3.8 Optimisation de l'Accès Temporel au Canal dans un Réseau WSN par Théorie des Graphes**

Dans cet article, Zo Ambinintsoa Andrianantenaina et al. [5] suggèrent un protocole TDMA multi-débit, développé pour les réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil (WSN). Le protocole est basé sur une gestion dynamique des slots temporels, en tenant compte des besoins variés des nœuds en termes de débit et de latence.

Une partie essentielle du travail repose sur la théorie des graphes, utilisée pour modéliser la topologie du réseau : chaque nœud est représenté par un sommet, et chaque lien de communication par une arête. À partir de ce graphe, un arbre couvrant est construit via un algorithme de parcours en largeur afin d'organiser la transmission de manière hiérarchique.

Les auteurs proposent également un graphique des conflits, pour définir les liens dont il est impossible de transmettre en même temps. Deux liens sont en conflit s'ils partagent un nœud commun ou s'ils se interfèrent en proximité. On peut utiliser ces graphiques pour formaliser des contraintes d'ordonnancement TDMA sans conflit, garantissant des transmissions en même temps sans perturbation.

Les résultats obtenus montrent que ce protocole améliore l'efficacité de l'utilisation du spectre, tout en assurant flexibilité, fiabilité et adaptabilité dans des environnements industriels dynamiques.

### **3.9 Contrôle de transmission dans les réseaux de radio cognitive**

Huang et Krishnamurthy, dans leur article [18] proposent une modélisation du contrôle de transmission dans un réseau de radio cognitive TDMA, où plusieurs utilisateurs secondaires accèdent de manière décentralisée au spectre. Le problème est formalisé comme un jeu dynamique de Markov à somme générale, en prenant en considération la qualité du canal de trans-

mission et les contraintes de latence propres à chaque utilisateur.

Les auteurs montrent que l'équilibre de Nash dans ce cadre correspond à une combinaison aléatoire de deux politiques de seuil pures, dont la structure monotone selon l'occupation du tampon facilite l'implémentation. afin d'évaluer ces politiques dans un environnement dynamique, ils développent un algorithme d'approximation stochastique capable de s'adapter aux variations du canal et du trafic. Cette approche met en évidence l'efficacité des jeux dynamiques de Markov pour concevoir des stratégies de transmission robustes et adaptatives dans les réseaux de radio cognitive.

### 3.10 Conception croisée et routage géographique dans les réseaux radio cognitifs ad hoc

Dans cet article [32], Hema Kumar Yarnagula et ses collaborateurs présentent un protocole de routage fondé sur une interaction croisée entre les couches MAC et réseau, spécifiquement conçu pour les réseaux radio cognitifs ad hoc. Ils introduisent un protocole MAC TDMA distribué, capable d'éviter les collisions entre utilisateurs secondaires grâce à un échange de messages de contrôle et à une sélection intelligente des canaux.

La couche réseau évalue la disponibilité des canaux à l'aide d'un modèle ON/OFF, puis communique le meilleur choix à la couche MAC. Le mécanisme de routage repose quant à lui sur une zone de requête adaptative en forme de tunnel, qui délimite les nœuds participant à la transmission.

Les résultats obtenus de la simulations montrent que cette approche permet d'améliorer considérablement le taux de livraison des paquets tout en réduisant la surcharge de diffusion, comparée aux méthodes traditionnelles. Elle optimise l'utilisation du spectre et s'adapte efficacement à la densité du réseau.

### 3.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons plongé dans les travaux qui ont été faits sur le protocole TDMA. Ce tour d'horizon nous a vraiment montré la grande diversité de méthodes mathématiques que les chercheurs ont utilisées pour l'analyser. On a notamment vu l'importance des chaînes de Markov, des systèmes de files d'attente, et même de la théorie des jeux dans leurs études. Ces modèles permettent d'évaluer et d'optimiser les performances de TDMA dans des environnements variés, qu'il s'agisse de réseaux sans fil classiques, de réseaux cellulaires ou de réseaux à large bande.

C'est précisément l'objectif de notre prochain chapitre. Nous allons nous concentrer sur le TDMA pour proposer un modèle qui va au-delà des approches classiques. En construisant un système de file d'attente  $M/M(a,b)/1$  qui intègre explicitement les délais de transmission, les changements de connexion et les périodes d'inactivité, nous chercherons à obtenir une analyse

plus juste et plus complète de ses performances et de la qualité de service. Dans ce chapitre, nous avons présenté un panorama structuré des travaux portant sur la modélisation et l'analyse des protocoles d'accès multiple, en mettant l'accent sur le protocole TDMA.

# 4

## Modélisation de TDMA dans la radio cognitive avec le système $M/M(a, b)/1$ .

### Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation d'un système de file d'attente  $M/M(a,b)/1$ , adapté aux réseaux de radio cognitive fonctionnant en mode TDMA. En tenant compte des différentes phases du serveur (activité, délai, vacances, basculement), nous proposons une analyse basée sur les chaînes de Markov à temps continu.

Cette approche nous permet d'évaluer la stabilité du système ainsi que ses performances. Des applications numériques, que nous avons réalisées en Python, permettent de visualiser l'impact des différents paramètres sur les performances du système et de nous guider dans son optimisation.

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	33
<b>4.1 Modélisation</b> . . . . .	34
<b>4.2 Description du modèle</b> . . . . .	34
<b>4.3 Stabilité du système</b> . . . . .	36
<b>4.4 Caractéristiques du système</b> . . . . .	37
<b>4.5 Illustrations numériques</b> . . . . .	38
<b>4.6 Conclusion</b> . . . . .	42

---

## 4.1 Modélisation

Considérons le système d'accès au canal radio cognitif, où les utilisateurs secondaires (SUs) transmettent leurs paquets selon une organisation TDMA. Dans ce cadre, chaque slot peut être utilisé pour transmettre une trame contenant un ou plusieurs paquets SUs. Le service correspond donc à l'occupation du canal par ces trames.

Le serveur, représentant la bande attribuée aux utilisateurs secondaires, alterne entre plusieurs états : actif, en attente (délai), en vacances, ou en transition (basculement). Lorsqu'il n'y a pas suffisamment de paquets en attente ( $- \mathbf{a}$ ), le serveur entre dans un état de délai avant éventuellement de partir en vacances. Si, à l'issue du délai, le seuil n'est toujours pas atteint, une trame vide est envoyée, ce qui reflète un usage inefficace du canal.

Ce comportement est modélisé à l'aide d'un système de file d'attente  $M/M(a,b)/1$  avec basculement et délai de vacances. La section 4.2 détaille ce modèle et les états associés au serveur. la structure mathématique de ce modèle et les états associés au serveur.

## 4.2 Description du modèle

Nous considérons un réseau (RC) composé d'utilisateurs primaires et d'utilisateurs secondaires. Le canal radio est partagé dans le temps selon une structure TDMA, c'est-à-dire qu'il est divisé en slots temporels utilisés pour l'accès des utilisateurs secondaires. Nous modélisons le système en supposant qu'un seul slot est alloué aux utilisateurs primaires à la fois. Ce slot peut être vu comme un serveur unique. Les clients secondaires sont identifiés par leurs identifiants (IDs), représentant des paquets de données, des sessions ou des connexions.

Nous examinons un système de file d'attente  $M/M(a,b)/1$  avec état de basculement et vacances retardées du serveur. Ce système se compose d'un serveur unique (la bande PU) et d'un espace d'attente infini pour les clients (la station de base CR enregistre l'ID des SUs). Si le serveur trouve moins de  $\mathbf{a}$  slots occupés (c'est-à-dire  $(\mathbf{a} - \mathbf{1})$  slots occupés par les sessions des PUs), il attend dans le système pendant un certain temps appelé délai avant de partir en vacances. Le délai peut être interrompu si la taille de la file d'attente devient  $\mathbf{a}$ , auquel cas le serveur reprend le service. Si le serveur trouve  $(\mathbf{a} - \mathbf{2})$  clients dans le système, il bascule dans le système. La durée du délai est exponentiellement distribuée avec une moyenne  $1/\theta_1$ . Si le délai s'écoule avant que la taille de la file d'attente ne devienne  $(\mathbf{a})$ , le serveur commence une période de vacances dont la durée est exponentiellement distribuée avec le paramètre  $\theta_2$ .

Les arrivées des paquets de données des SUs sont des processus de Poisson avec des taux d'arrivée  $\lambda$ . Les temps pour le service sont distribués de manière exponentielle avec un taux  $\mu$ . La discipline de service que nous avons considérée est FIFO, c'est-à-dire que la station de base CR enregistre l'ID de chaque client SU lorsqu'il arrive.

Nous représentons l'état du système au temps  $t$  par une paire  $(J(t), N(t))$ , où  $N(t)$  désigne le nombre de clients dans le système et  $J(t)$  désigne l'état du serveur. Le processus  $(J(t), N(t)); t \geq 0$  définit une chaîne de Markov à temps continu avec des taux de transition non nuls et un espace d'états :

- $N(t) = \{0, 1, 2, \dots\}$  : le nombre de clients dans le système à l'instant  $t$ .
- $J(t) = \{0, 1, 2, 3\}$  : définit l'état du serveur à l'instant  $t$ .

$$J(t) = \begin{cases} 0 & \text{le serveur est en vacance,} \\ 1 & \text{le serveur dans le délai,} \\ 2 & \text{le serveur occupé (servi les SUs),} \\ 3 & \text{état de basculement.} \end{cases}$$

**le diagramme de transitions :**

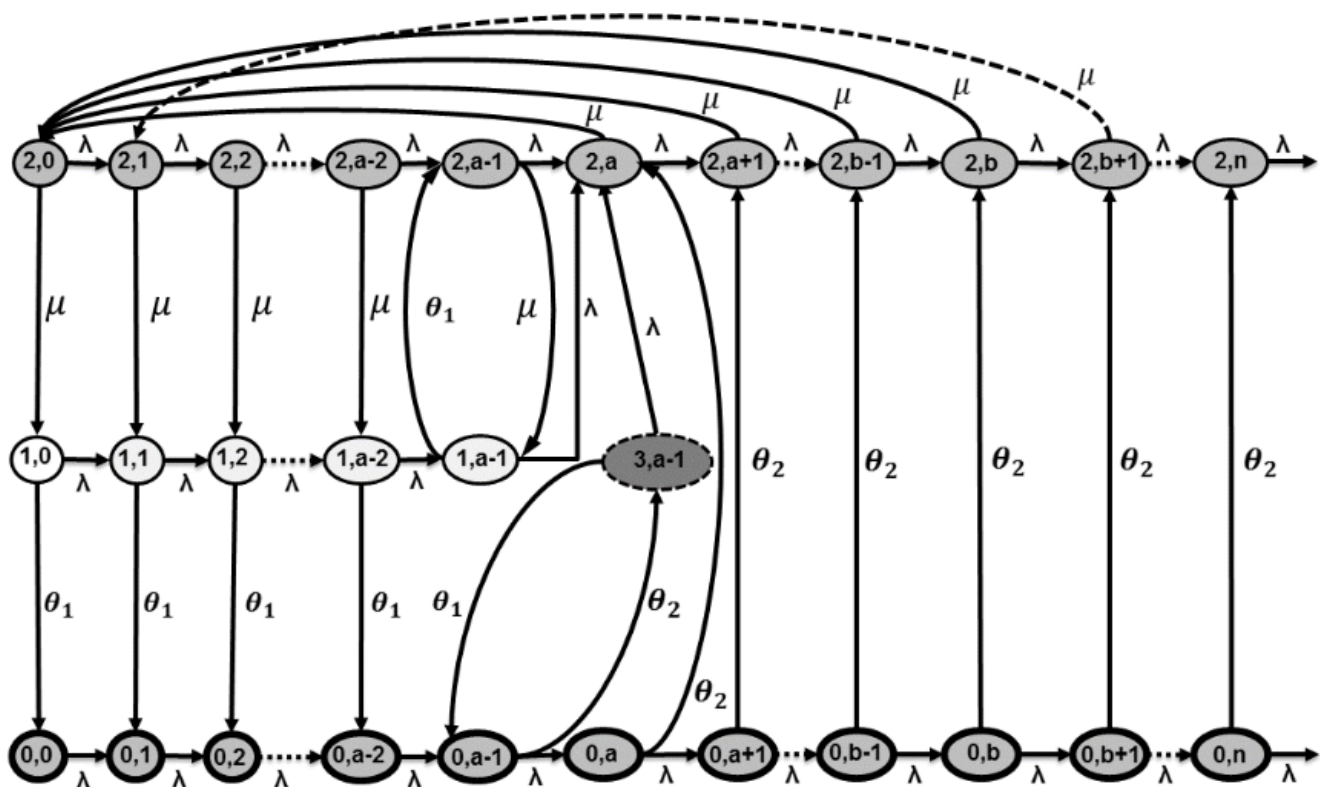


FIGURE 4.1 – Diagramme de transitions du système .

Selon ce diagramme, les équations d'équilibre du système markovien ont été définies comme suit :

$$\lambda P_{0,0} = \theta P_{1,0} \quad (4.1)$$

$$\lambda P_{0,n} = \theta P_{1,n} + \lambda P_{0,n-1} \quad 1 \leq n \leq a-2 \quad (4.2)$$

$$(\theta_2 + \lambda)P_{0,a-1} = \lambda P_{0,a-2} + \mu P_{3,a-1} \quad (4.3)$$

$$(\theta_2 + \lambda)P_{0,n} = \lambda P_{0,n-1} \quad n \geq a \quad (4.4)$$

$$(\theta + \lambda)P_{1,0} = \mu P_{2,0} \quad (4.5)$$

$$(\theta + \lambda)P_{1,n} = \mu P_{2,n} + \lambda P_{1,n-1} \quad 1 \leq n \leq a-1 \quad (4.6)$$

$$(\theta + \lambda)P_{1,n} = \mu P_{2,n} + \lambda P_{1,n-1} \quad 1 \leq n \leq a-1 \quad (4.7)$$

$$(\lambda + \mu)P_{2,0} = \mu \sum_{n=a}^b P_{2,n} \quad (4.8)$$

$$(\lambda + \mu)P_{2,n} = \mu P_{2,n+b} + \lambda P_{2,n-1} \quad 1 \leq n \leq a-2 \quad (4.9)$$

$$(\lambda + \mu)P_{2,a-1} = \mu P_{2,a+b-1} + \lambda P_{2,a-2} + \theta P_{1,a-1} \quad (4.10)$$

$$(\lambda + \mu)P_{2,a} = \mu P_{2,a+b} + \lambda P_{2,a-1} + \theta_2 P_{0,a} + \lambda P_{1,a-1} + \lambda P_{3,a-1} \quad (4.11)$$

$$(\lambda + \mu)P_{2,n} = \mu P_{2,n+b} + \lambda P_{2,n-1} + \theta_2 P_{0,n} \quad : n \geq a+1 \quad (4.12)$$

$$(\lambda + \mu)P_{3,a-1} = \theta_2 P_{0,a-1} \quad (4.13)$$

### 4.3 Stabilité du système

Comme le serveur n'est pas tout le temps actif. Il passe du temps :

- de Serveur actif.
- à attendre (délai)
- en vacances,
- ou bien en transition (basculement).

Donc, on doit pondérer le taux de service  $\mu$  par le temps pendant lequel le serveur est réellement actif.

$P_{2,n}$  est la probabilité stationnaire d'être dans l'état où : le serveur est actif et on a "n" clients dans le système.

#### 4.3.1 Condition de stabilité

Pour que le système soit stable, le taux moyen de traitement doit être plus grand que le taux moyen d'arrivée :

$$\lambda < \mu \sum_{n=0}^{\infty} P_{2,n} \quad (4.14)$$

$$\frac{\lambda}{\mu \sum_{n=0}^{\infty} P_{2,n}} < 1 \quad (4.15)$$

## 4.4 Caractéristiques du système

1.  $L_0$  est le Nombre moyen de clients pendant que le serveur est en vacances :

$$L_0 = \left( D + \frac{\lambda + \theta_1}{\lambda} \cdot P_{1,0} \right) \cdot \left[ \sum_{n=0}^{a-1} n - \sum_{n=0}^{a-1} n \left( \frac{\lambda}{\lambda + \theta_1} \right) + E \cdot \frac{\theta_1}{\lambda} \cdot F \cdot \left( q^{2-a} \cdot \frac{1}{(1-q)^2} - q^{1-a} \cdot \sum_{n=0}^{a-1} nq^n + (a-1) \right) \right]. \quad (4.16)$$

2.  $L_1$  est le nombre moyen de clients pendant le retard :

$$L_1 = \left[ P_{1,0} + \mu A_1 r_1 \cdot \left( \frac{\lambda + \theta_1}{\theta_1} \right) \right] \cdot \sum_{n=0}^{a-1} n \left( \frac{\lambda}{\lambda + \theta_1} \right)^n \quad (4.17)$$

3.  $L_2$  est le nombre moyen de clients dans l'état actif :

$$L_2 = nA_1 \left[ \frac{r_1}{(1-r_1)^2} + \frac{\theta_2 C}{\lambda + \mu - \mu q^b - \lambda q^{-1}} \cdot \left( \frac{q}{(1-q)^2} - \sum_{n=0}^{a-1} nq^n \right) \right] \quad (4.18)$$

où

$$D = \frac{\lambda + \theta_1}{\lambda} \cdot \mu A_1 r_1 + \frac{\lambda + \theta_1}{\theta_2} \quad (4.19)$$

$$E = \frac{\theta_1(\lambda + \mu)}{\lambda(\lambda + \mu + \theta_2)} \quad (4.20)$$

$$F = \frac{\lambda}{\theta_1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda + \theta_1} \right)^{a-1} \right] \quad (4.21)$$

$$C = \left( \frac{\lambda}{\theta_2 + \lambda} \right)^{a-1} \quad (4.22)$$

$$q = \frac{\lambda}{\theta_2 + \lambda} \quad (4.23)$$

$$k = \frac{\theta_2 \cdot C}{\lambda + \mu - \mu q^b - \lambda q^{-1}} \quad (4.24)$$

$$P_{1,0} = \frac{\lambda}{\lambda + \theta} \cdot P_{2,0} \quad (4.25)$$

$$X = (1 - F) + E \cdot F \cdot \frac{\theta_1}{\lambda} \cdot \left( \frac{\lambda + \theta_2}{\theta_2} + \frac{\theta_2}{\lambda + \mu} \right) \quad (4.26)$$

$$G = A_1 r_1 \left( \frac{1 - r_1^{a-1}}{1 - r_1} \right) + A_1 r_1^a \cdot \left( \frac{1}{1 - r_1} \right) + \frac{\theta_2 \cdot C \cdot q^a}{(\lambda + \mu - \mu q^b - \lambda q^{-1})(1 - q)} \quad (4.27)$$

$$A_1 = \frac{1 - r_1}{(1 - r_1)(\lambda + \mu)r_1 - \mu r_1(1 - r_1^b)} \cdot \left[ \frac{\theta_2 \cdot C \cdot q \cdot (1 - q^b)}{(\lambda + \mu - \mu q^b - \lambda q^{-1})(1 - q)} - \mu P_{2,0} \right] \quad (4.28)$$

$$P_{1,0} = \frac{G + DX}{\frac{\lambda + \theta_1}{\mu} + (1 + F) + \left( \frac{\lambda + \theta_1}{\lambda} \right) X} \quad (4.29)$$

$r_1$  est la solution unique de l'équation (4.30) dans l'intervalle  $[0, 1]$  d'après le théorème de Rouché.

$$\mu r^{b+1} - (\lambda + \mu)r + \lambda = 0 \quad (4.30)$$

## 4.5 Illustrations numériques

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

### 1) Pendant la période de vacance

Pour les paramètres fixés  $\mu = 0,6$ ,  $\theta_1 = 0,6$ ,  $\theta_2 = 0,3$  et  $b = 10$ , nous avons représenté dans la Figure 4.2 l'évolution du nombre moyen de clients dans le système pendant que le serveur est en vacances, en fonction du seuil d'activation du service  $a$ , pour différentes valeurs du taux d'arrivée  $\lambda$ .

Les résultats montrent qu'une augmentation de  $a$  entraîne une augmentation du nombre moyen de clients pendant la vacance. Cela s'explique par le fait que plus la valeur de  $a$  est grande, plus le serveur attend qu'un nombre important de clients soit présent avant de démarrer le service.

Ces résultats soulignent l'importance de bien choisir le paramètre  $a$  afin de maintenir un équilibre entre la qualité de service et l'efficacité du système.

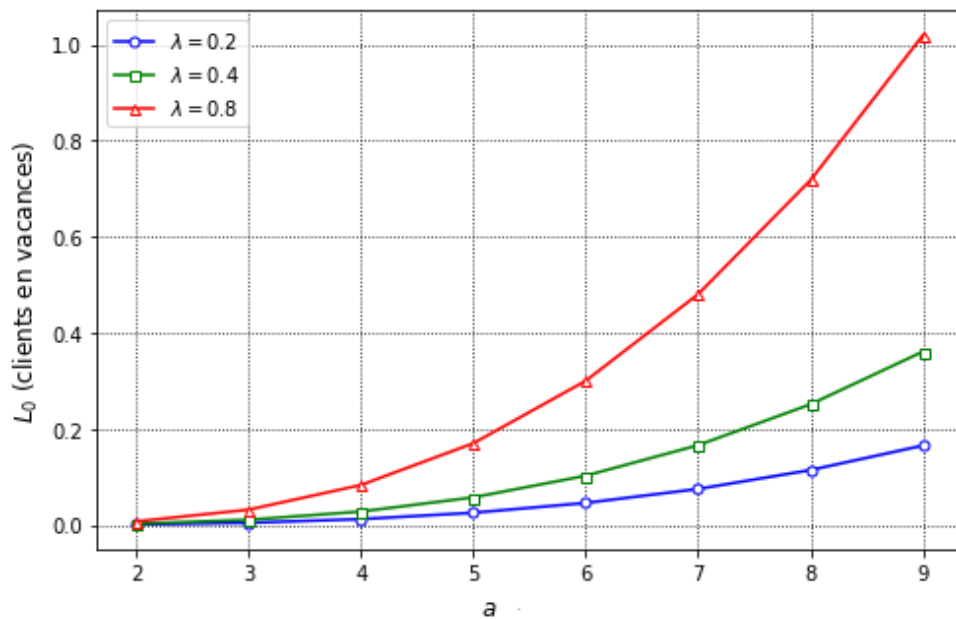


FIGURE 4.2 –  $L_0$  en fonction de  $a$  pour différentes valeurs de  $\lambda$ .

Pour  $\mu = 0.6$ ,  $\theta_1 = 0.6$ ,  $a = 5$  et  $b = 10$ , nous avons représenté dans la FIGURE 4.3 le nombre moyen de clients dans le système pendant que le serveur est en vacances.

Les résultats indiquent qu'une augmentation du taux de retour de vacances  $\theta_2$  réduit la charge du système, quelle que soit la valeur de  $\lambda$ .

Cela s'explique par le fait qu'en augmentant  $\theta_2$ , le serveur (le spectre) réagit plus rapidement, ce qui permet un service plus rapide des clients.

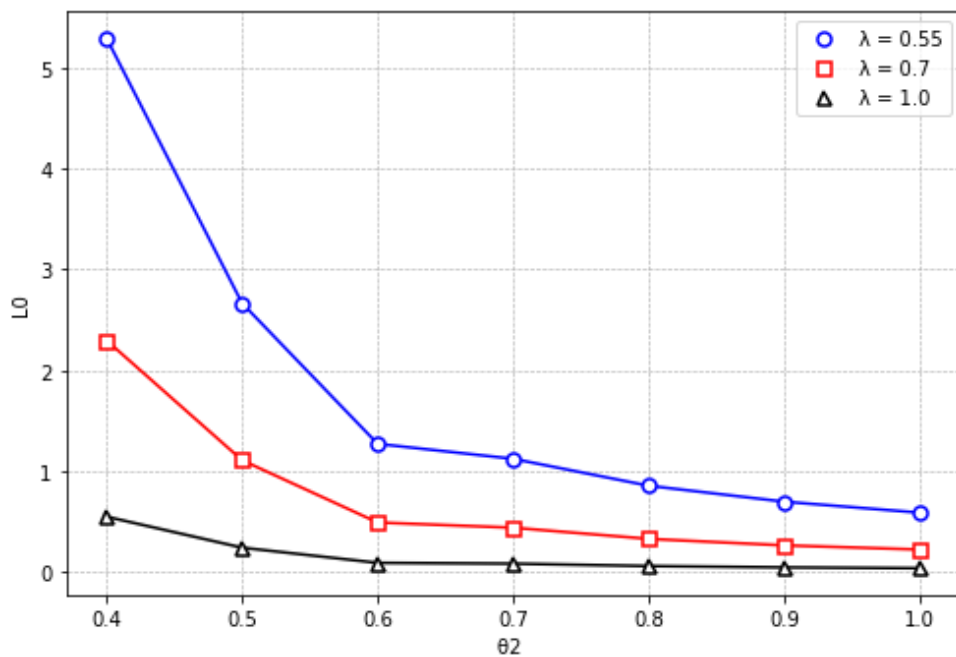


FIGURE 4.3 –  $L_0$  en fonction de  $\theta_2$  pour différentes valeurs de  $\lambda$ .

## 2) Pendant le retard (délai)

Pour  $\mu = 0.5$ ,  $\theta_2 = 0.5$ ,  $b = 20$  et  $a = 6$ , nous avons représenté dans la FIGURE 4.4 le nombre moyen de clients dans le système pendant la phase de retard (délai). Nous observons que le nombre moyen de clients augmente progressivement dans le système. Cela montre que, si le taux de départ en vacances ( $\theta_1$ ) augmente, et ce quelle que soit la valeur du taux d'arrivée  $\lambda$ , la charge du système tend à s'intensifier. Cela s'explique par le fait que le spectre quitte plus rapidement l'état de délai pour entrer en vacances, plutôt que de basculer vers le service.

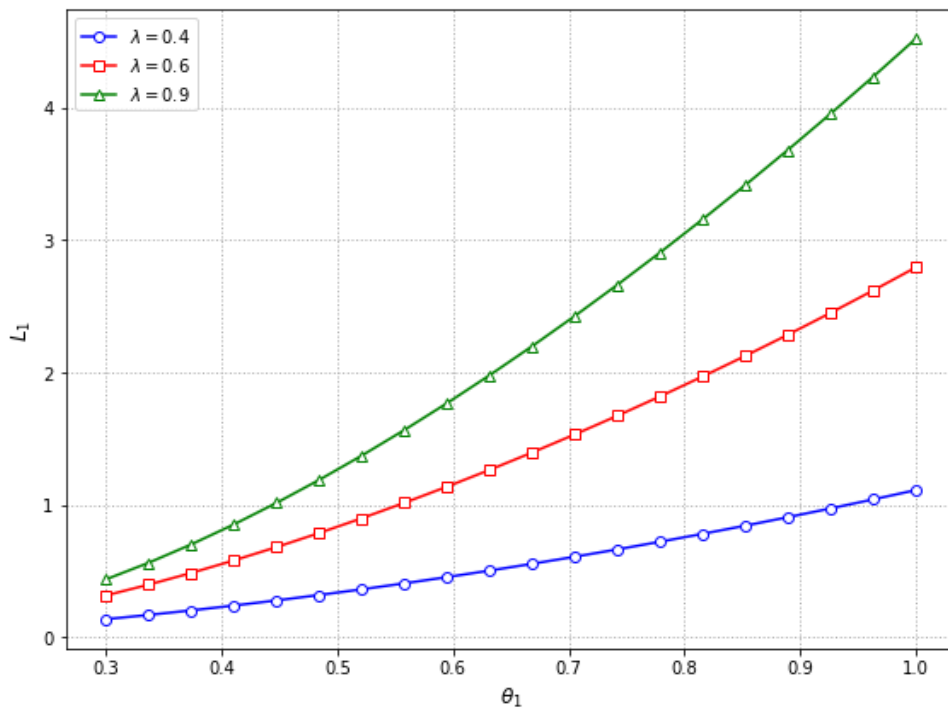
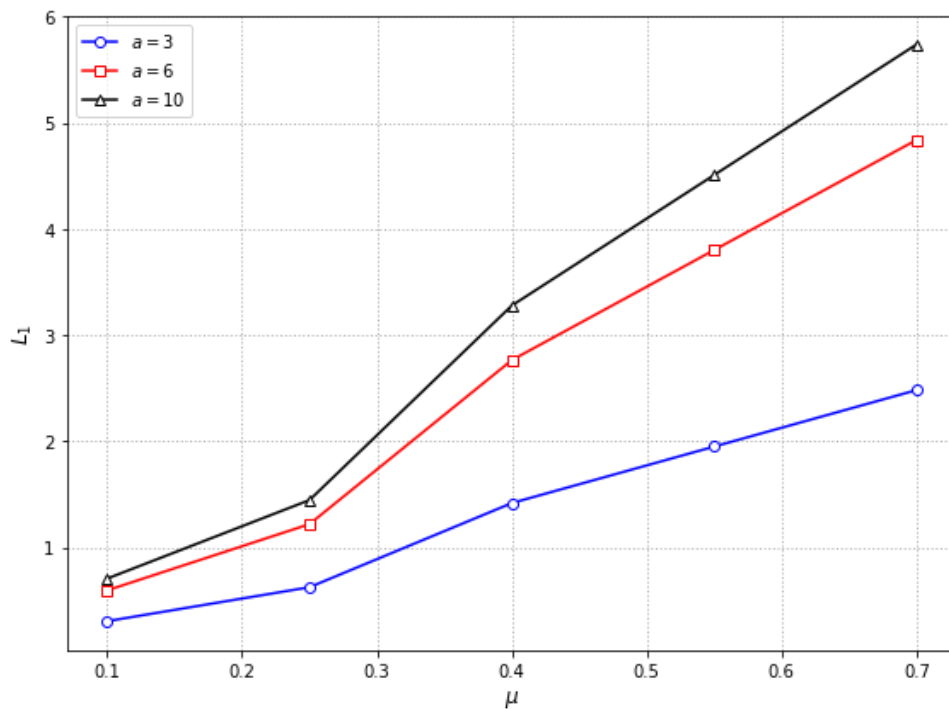


FIGURE 4.4 –  $L_1$  en fonction de  $\theta_1$  pour différentes valeurs de  $a$ .

Pour  $\lambda = 0.6$ ,  $\theta_2 = 0.5$ ,  $b = 20$  et  $\theta_1 = 0.5$ , nous avons représenté dans la FIGURE 4.5 le nombre moyen de clients dans le système pendant le retard (délai). Nous observons que le nombre moyen de clients augmente progressivement dans le système. Cela indique que, si le taux de service ( $\mu$ ) augmente, et ce quel que soit le seuil ( $a$ ), la charge du système s'intensifie. Cela s'explique par le fait que l'envoi d'une trame vide devient plus probable que le service effectif des clients, ce qui fait entrer le système plus souvent dans une phase de retard ou de vacance.

FIGURE 4.5 –  $L_1$  en fonction de  $\mu$  pour différentes valeurs de  $a$ .

### 3) Dans l'état actif

Pour  $\mu = 0.5$ ,  $\theta_1 = 0.5$ ,  $a = 5$  et  $b = 20$ , nous avons représenté dans la FIGURE 4.6 le nombre moyen de clients dans le système pendant que le serveur est en état actif. Les résultats indiquent que, pour trois valeurs de  $\lambda$  ( $\lambda = 4$ ,  $\lambda = 6$  et  $\lambda = 8$ ), le nombre moyen de clients augmente progressivement dans un premier temps, puis se met à baisser. Cette hausse s'explique par un léger retard avant le service. Elle se traduit donc par une meilleure disponibilité du spectre pour accueillir plus d'utilisateurs secondaires.

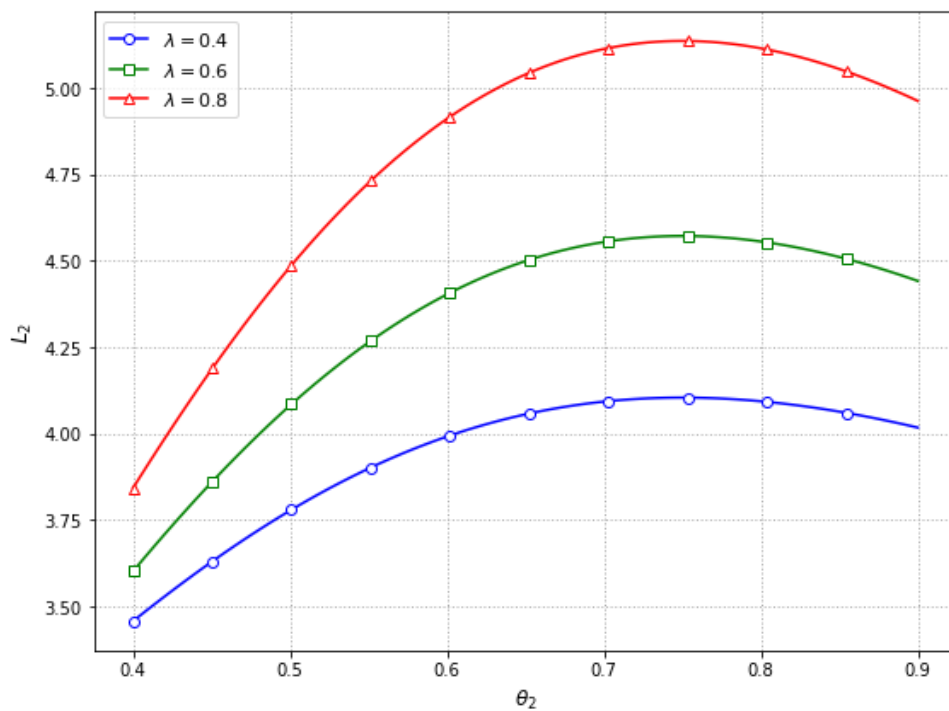


FIGURE 4.6 –  $L_2$  en fonction de  $\theta_2$  pour différentes valeurs de  $\lambda$ .

## 4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une modélisation du système M/M(a,b)/1 appliquée au protocole TDMA dans le contexte des réseaux de radio cognitive. Nous avons établi les équations d'équilibre décrivant le comportement du serveur. L'analyse de la stabilité du système, ainsi que l'étude de ses caractéristiques telles que le nombre moyen de clients dans chaque état, nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement global du système.

Nous avons également effectué une application numérique, réalisée à l'aide du langage Python. Cette application nous a permis de visualiser l'impact des différents paramètres sur les performances du système. Les résultats obtenus confirment la validité du modèle théorique proposé et offrent une base solide pour de futures améliorations et extensions.

# Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons abordé la problématique cruciale de la sous-utilisation du spectre radioélectrique, un enjeu majeur à l'ère des communications sans fil massivement déployées. La radio cognitive s'est imposée comme une solution technologique prometteuse, qui permet aux utilisateurs secondaires (SUs) la détection et d'exploitation opportunément des bandes de fréquences temporairement libres, sans perturbation des autres utilisateurs primaires (PUs). Cependant, cette exploitation dynamique du spectre exige une coordination rigoureuse entre les différents acteurs du réseau, notamment au niveau de l'accès au canal.

Dans ce contexte, nous avons étudié l'intégration du protocole TDMA dans un environnement de radio cognitive, et nous avons adopté une modélisation mathématique rigoureuse basée sur la théorie des files d'attente. Plus précisément, nous avons proposé un modèle  $M/M(a,b)/1$  avec états de vacances, de délai et de basculement, afin de mieux capturer les comportements réels du système, notamment les transitions entre les différents états opérationnels du serveur. Cette approche a permis de représenter fidèlement la dynamique d'un canal partagé entre utilisateurs primaires et secondaires.

L'analyse mathématique du système, appuyée par l'application numériques, nous a permis d'évaluer les performances de notre système. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'impact de plusieurs paramètres sur la qualité de service des SU et ont confirmé la pertinence de notre modélisation.

Ce travail ouvre la porte à plusieurs élargissements. Il serait pertinent d'explorer des modèles plus riches intégrant plusieurs canaux, des politiques d'accès intelligentes ou encore des utilisateurs aux priorités différenciées. De telles extensions permettraient de mieux répondre aux besoins des réseaux sans fil de nouvelle génération.

# Bibliographie

- [1] ABDALZAHER, M. S., AND MUTA, O. Employing game theory and tdma protocol to enhance security and manage power consumption in wsns-based cognitive radio. *IEEE Access* 7 (2019).
- [2] AISSANI, D. Évaluation des performances des systèmes informatiques. *Cours de Post-Graduation, USTHB Alger* (1988).
- [3] ALEM, L. M. Inégalités stochastiques des systèmes de files d'attente avec rappels à communication bidirectionnelle. *Mémoire de Magister, Université de Béjaïa* (2014).
- [4] AMRAOUI, A., BENMAMMAR, B., AND BENDIMERAD, F. T. Accès dynamique au spectre dans le contexte de la radio cognitive. *Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen, Université Abou Bekr Belkaid, Algérie* (2012).
- [5] ANDRIANANTENAINA, Z. A., RAKOTOMIRAHO, S., AND RANDRIAMAROSON, R. M. Vers un protocole tdma multi-débit à diversité spatiale pour les réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil : Modélisation et vérification. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)* 25, 2 (2021), 275–287.
- [6] ARRAR, N. Problèmes de convergence, optimisation d'algorithmes et analyse stochastique de systèmes de files d'attente avec rappels. *Thèse de Doctorat, Univ. Panthéon-Sorbonne et Univ. Annaba* (2012).
- [7] BAYNAT, B. La théorie des files d'attente : des chaînes de markov aux réseaux à forme produit. *Hermès Science Publications* (2000).
- [8] BAYRAKDAR, M. E., AND CALHAN, A. Performance evaluation of tdma medium access control protocol in cognitive wireless networks. *Computer Science Journal of Moldova* 25, 1 (2017).
- [9] BENMAMMAR, B. Application des techniques d'enchères dans les réseaux de radio cognitive. *arXiv* (2014).
- [10] BENMAMMAR, B., AND AMRAOUI, A. Réseaux de radio cognitive : Allocation des ressources radio et accès dynamique au spectre. *Preprint HAL* (2014).
- [11] BOURMADA, A. Vers une approche cross layer pour le support de la qos dans les réseaux de capteurs sans fil. *Thèse de Doctorat, Université de Batna 2* (2017).
- [12] CHAOUB, A., IBN ELHAJ, E., AND EL ABBADI, J. Video transmission over cognitive radio tdma networks under collision errors. *International Journal of Computer Applications* 178, 7 (2019).
- [13] COSTA, V. H. T., VIEIRA, F. H. T., AND SOUZA, G. B. C. Performance modeling and analysis of ofdm-tdma wireless systems based on queueing theory. *Journal of Communications and Networks* 20, 4 (2018), 356–364.

- [14] DJEDIAI, M., AND KAMA, B. Évaluation des performances des différents protocoles de routage des réseaux ad hoc pour les réseaux multi-uav (fanet) : Étude comparative des protocoles dsdv et aodv. *Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla* (2020).
- [15] FARTAS, R., ADEL-AISSANOU, K., AND LEKADIR, O. Évaluation de performance du modèle M/M(a,b)/1. *Rapport LAMOS, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa* (2025).
- [16] GAMAL, S., ZAGHLOUL, A., RIHAN, M., HUSSIN, S., AND SALEM, A. A. Multiple access in cognitive radio networks : From orthogonal and non-orthogonal to rate-splitting. *IEEE Access* 9 (2021), 95569–95596.
- [17] HAYKIN, S. Cognitive radio : Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 23, 2 (2005), 201–220.
- [18] HUANG, J. W., AND KRISHNAMURTHY, V. Transmission control in cognitive radio as a markovian dynamic game : Structural result on randomized threshold policies. *IEEE Transactions on Communications* 58, 3 (2010), 941–950.
- [19] IBRAHIM, A. Protocoles d'accès multiple orientés qualité de service en constellation de satellite à orbite basse. *Mémoire de Master, Université de Tlemcen* (2004).
- [20] JONDRAI, F. K. Software-defined radio—basics and evolution to cognitive radio. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 3 (2005), 275–283.
- [21] KAUER, F., AND TURAU, V. An analytical model for wireless mesh networks with collision-free tdma and finite queues. *Ad Hoc Networks* 73 (2018), 1–15.
- [22] KENDALL, D. G. Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of the embedded markov chain. *The Annals of Mathematical Statistics* 24 (1953), 338–354.
- [23] LAKAOUR, L. Modélisation, analyse et évaluation des méthodes d'accès au médium dans les réseaux sans fil. *Mémoire de Master, Université de Béjaïa* (2019).
- [24] LEVY, Y., AND YECHIALI, U. Utilization of idle time in an m/g/1 queueing system. *Management Science* 22, 2 (1975), 202–211.
- [25] LITTLE, J. D. C. A proof of the queueing formula  $l = \lambda w$ . *Operations Research* 9, 3 (1961), 383–387.
- [26] MSAKNI, M. Ordonnancement décentralisé au niveau de la couche mac pour les réseaux maillés radio cognitive. *Mémoire de Maîtrise, ÉTS Montréal* (2015).
- [27] NACEUR, T. Systèmes de files d'attente stratégiques avec information contrôlée. *Thèse de Doctorat, Université d'Avignon* (2020).
- [28] PARIMALA, R. S., AND PALANIAMMAL, S. Single server queueing model with server delayed vacation and switch over state. *Applied Mathematical Sciences* 8, 163 (2014), 8113–8124.
- [29] PERKINS, C. E. Ad hoc networking : An overview. *IEEE Communications Magazine* 39, 1 (2001), 85–95.
- [30] REGAÏ, Z. A. Égalisation aveugle multiutilisateurs pour les systèmes ds-cdma dans les réseaux des téléphones mobiles. *Mémoire de Magister, Université Saâd Dahlab de Blida* (2010).
- [31] YAHI, S., AND MALLEK, F. Sécurité et routage dans les réseaux ad hoc. *Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté de Génie Électrique et d'Informatique, Département d'Électronique* (2013).

- 
- [32] YARNAGULA, H. K., DEKA, S. K., AND SARMA, N. A cross-layer based location-aware forwarding using distributed tdma mac for ad-hoc cognitive radio networks. *Wireless Personal Communications* 95, 2 (2017), 123–135.
- [33] ZHAO, Y., JIN, S., AND YUE, W. Performance analysis of cognitive radio networks for secondary users with slotted central control. *Telecommunication Systems* 66 (2017), 689–699.

---

## Résumé

---

Dans ce mémoire, nous avons étudié la modélisation de l'accès au spectre dans les réseaux à radio cognitive utilisant le protocole TDMA. Face à la rareté du spectre, nous avons considéré la radio cognitive comme une solution permettant aux utilisateurs secondaires d'exploiter dynamiquement les bandes libres sans interférer avec les utilisateurs primaires.

Nous avons modélisé ce comportement à l'aide d'un système de files d'attente  $M/M(a,b)/1$  avec vacances, représenté par une chaîne de Markov à temps continu. Cette modélisation nous a permis d'analyser l'organisation du service en fonction du nombre de clients présents et de la disponibilité du canal.

Nous avons établi les équations d'équilibre du système afin d'évaluer différents indicateurs de performance, notamment le nombre moyen de clients en attente ou en service. Nous avons ensuite développé des applications numériques sous Python pour analyser l'impact des paramètres du modèle sur les performances globales du système.

**Mots-clés** : Radio cognitive, Protocole TDMA, Files d'attente, Utilisateurs primaires, Utilisateurs secondaires, Modélisation.

---

## Abstract

---

In this thesis, we studied the modelling of spectrum access in cognitive radio networks using the TDMA protocol. Given the scarcity of spectrum, we considered cognitive radio as a solution enabling secondary users to dynamically exploit free bands without interfering with primary users.

We modelled this behaviour using an  $M/M(a,b)/1$  queuing system with vacancies, represented by a continuous-time Markov chain. This modelling enabled us to analyse the organisation of the service as a function of the number of customers present and the availability of the channel. We established the equilibrium equations for the system in order to evaluate various performance indicators, in particular the average number of customers waiting or in service. We then developed numerical applications in Python to analyse the impact of the model's parameters on the system's overall performance.

**Keywords** : Cognitive radio, TDMA protocol, Queues, Primary users, Secondary users, Modelling.