

République Algérienne Démocratique et Populaire Université Abou Bekr Belkaid –  
Tlemcen Faculté des Sciences

Département d'Informatique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique

*Option : Réseaux et Systèmes Distribués (R.S.D)*

*Thème*

Application des méthodes exactes dans les réseaux de radio  
cognitive

**Réalisé par :**

**BOUYERDEN AMINA**

**HECHAM FATIMA ZOHRA**

*Présenté le 24 juin 2020 devant le jury composé de :*

M<sup>r</sup> BENMAMMAR Badr (President)

M<sup>r</sup> BELHOCINE Amin (Examineur)

M<sup>r</sup> BENMOUNA Youcef (Encadrant)

Année universitaire : 2019 – 2020

## *Remerciements*

*Tout d'abord, nous remercions le Dieu tout puissant clément et miséricordieux de nos avoir soigné et aidé pour réaliser ce travail.*

*Au terme de ce travail nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant monsieur **M.BENMOUNA YUCEF** pour son encadrement et ses conseils et son aide constant qu'il nous ont apportés tout au long de ce travail. Ainsi que pour les remarques constructives qu'il a su nous donner lors de rédaction de ce mémoire.*

*Nous adressons notre plus sincères remerciement à l'ensemble des membres de jury qui ont accepté d'examiner et l'évaluer ce travail.*

***M. BENMAMMAR BADR** et **M.BELHOCINE AMINE** pour nous avoir fait le grand honneur de présider le jury de cette mémoire.*

*Aussi, nous tenons nos vifs remerciements à tous les enseignants de département d'informatique qui, par leur enseignement, ont contribué à notre formation durant toutes nos études à l'université de Tlemcen.*

*Finalement, il nous reste à mentionner le plaisir à nos familles pour leur encouragement et leur aide, ainsi que toutes les personnes qui nous ont apporté un soutien moral de loin ou de près tout au long de nos études particulièrement.*

## Dédicace :

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Premièrement, à la source de ma vie et le plus beau cadeau de mon dieu, mes chers parents :*

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour tout son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.*

*Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit, Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et soutient permanent venu de toi. Mes sœurs Hanan, Sihame et Bouchra et qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérances, de courage.*

*Tous ma famille et mes collègues sans exception, et plus particulièrement à mon binôme et mon intime Bouyerden Amina .*

*Fatima*

*Avant tout, je remercie le dieu, qui m'a aidé et m'a donné la patience pour accomplir ce travail.*

*A mes très chers parents, ma mère pour ses encouragements et ses Prières tout au long de mes études, mon père pour tous ce qu'il avait fait pour avoir ce résultat. Et A chaque membre de ma petite famille, Mes frères : Mohamed et Ibrahim*

*Je remercie de fond du cœur mes Chers amis et surtout mon binôme Fatima qui sera en réalité ma sœur*

*A Tous mes collègues de la promotion 2020 de RSD, et tous mes amis de l'université de Tlemcen, et plus particulièrement ceux qui ont toujours été présents pour m'encourager à poursuivre ce travail.*

*A mes cousins, cousines, tantes et oncles qui ont su m'apporter leur aide et leurs encouragements, ainsi que toute ma grande famille.*

*Amina*

# Résumé

---

---

Les réseaux de radio cognitive présentés comme étant un nouveau paradigme de communication qui viendrait à bout de la mauvaise utilisation de la ressource spectrale. En effet, le problème d'allocation statique qui génère un déséquilibre. La radio cognitive propose une exploitation opportuniste du spectre radio via quelques techniques intelligentes.

Dans ce manuscrit, nous proposons l'algorithme de séparation et évaluation (B&B) comme méthode exacte pour la modulation multi porteuse OFDM, pour assurer une meilleure qualité de service de cette dernière. L'efficacité de cette méthode a été justifiée par une étude comparative avec une méta heuristique qui est l'algorithme de l'optimisation des particules en essaim (PSO).

**MOTS CLES :** Radio cognitive, optimisation en essaim particulaires, l'algorithme de séparation et évaluation, Multiplexage par division de fréquences orthogonales.

## Abstract

---

---

Cognitive radio networks are presented as a new communication paradigm that would overcome the misuse of the spectral resource. Indeed, to the problem of static allocation which generates an imbalance. Cognitive radio offers an opportunistic exploitation of the radio spectrum via some intelligent techniques.

In this manuscript, we propose the Branch and Bound algorithm (B&B) as an exact method for OFDM multi-carrier modulation, to ensure a better quality of service.

The effectiveness of this method has been justified with a comparative study with a metaheuristic, which is the algorithm of particle swarm optimization (PSO).

**KEY WORDS:** Cognitive radio, particle swarm optimization, separation algorithm and evaluation, Multiplexing by orthogonal frequency division.

## ملخص

---

---

يتم تقديم شبكات الراديو المعرفية كنموذج اتصال جديد من شأنه التغلب على سوء استخدام المورد الطيفي. في الواقع، لمشكلة التخصيص الثابت الذي يولد عدم التوازن. يقدم الراديو المعرفي استغلالاً انتهازياً للطيف الراديوي من خلال بعض التقنيات الذكية. في هذه المخطوطة، نقترح خوارزمية الفصل والتقييم (B & B) كطريقة دقيقة لتشكيل OFDM متعدد الموجات الحاملة، ولضمان جودة خدمة أفضل لها. تم تبرير فعالية هذه الطريقة من خلال دراسة مقارنة مع خوارزمية تحسين سرب الجسيمات (PSO).

**الكلمات الأساسية:** الراديو المعرفي، تحسين الجسيمات الدقيقة، خوارزمية الفصل والتقييم، التموجات من خلال تقسيم التردد المتعامد.

## **Table des matières :**

<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : La radio cognitive</b>	<b>3</b>
<b>I.1 Introduction</b>	<b>4</b>
<b>I.2 Radio Logicielle (Software Radio)</b>	<b>4</b>
<b>I.2.1 Radio logicielle restreinte (SDR)</b>	<b>4</b>
<b>I.3 Radio Cognitive</b>	<b>5</b>
<b>I.3.1 Historique</b>	<b>5</b>
<b>I.3.2 Définition</b>	<b>6</b>
<b>I.3.3 Relation entre Radio Cognitive et Radio Logicielle Restreinte</b>	<b>6</b>
<b>I.3.4 Architecture de la Radio Cognitive</b>	<b>7</b>
<b>I.3.5 Cycle de cognition et orientation</b>	<b>8</b>
<b>I.3.6 Les fonctions de la Radio Cognitive</b>	<b>9</b>
<b>I.3.6.1 Détection de spectre (Spectrum Sensing)</b>	<b>9</b>
<b>I.3.6.2 Gestion du spectre (Spectrum management) :</b>	<b>10</b>
<b>I.3.6.3 Mobilité du spectre (Spectrum mobility)</b>	<b>11</b>
<b>I.4 Réseau Radio Cognitive(RRC)</b>	<b>11</b>
<b>I.4.1 L'architecture des Réseaux Radio Cognitive</b>	<b>11</b>
<b>I.4.2 La gestion spectrale</b>	<b>12</b>
<b>I.5 Accès dynamique au spectre</b>	<b>12</b>
<b>I.5.1 Accès au spectre en utilisant les enchères</b>	<b>13</b>
<b>I.5.2 Accès au spectre en utilisant la Théorie des jeux</b>	<b>13</b>
<b>I.5.3 Accès au spectre en utilisant les chaînes de Markov</b>	<b>13</b>
<b>I.5.4 Accès au spectre en utilisant les méta-heuristiques</b>	<b>14</b>
<b>I.6 Domaines d'application de la Radio Cognitive</b>	<b>14</b>
<b>I.7 Conclusion</b>	<b>15</b>
<b>Chapitre II :OFDM (Multiplexage par division de fréquences orthogonales)</b>	<b>16</b>
<b>II.1 Introduction</b>	<b>17</b>
<b>II.2 Historique d'OFDM</b>	<b>17</b>
<b>II.3 Définition d'OFDM</b>	<b>18</b>

<b>II.4 Notions d'orthogonalité</b>	<b>19</b>
<b>II.5 Principe de l'OFDM</b>	<b>20</b>
<b>II.6 Applications courantes de la modulation OFDM</b>	<b>21</b>
<b>II.7 Conclusion</b>	<b>22</b>
<b>Chapitre III : Méthode de résolution exacte et approchée</b>	<b>23</b>
<b>III.1 Introduction</b>	<b>24</b>
<b>III.2 Méthode de résolution approchée</b>	<b>24</b>
<b>III.2.1 Les heuristiques (spécifiques)</b>	<b>24</b>
<b>III.2.2 Les méta-heuristiques</b>	<b>25</b>
<b>III.2.2.1 Le recuit simulé</b>	<b>25</b>
<b>III.2.2.2 L'algorithme PSO (Particule Swarm Optimisation)</b>	<b>25</b>
<b>III.2.2.2.1 Mode de fonctionnement de l'algorithme PSO</b>	<b>25</b>
<b>III.2.2.2.2 Organigrammes PSO standard</b>	<b>26</b>
<b>III.3 Les méthodes de résolution exactes</b>	<b>29</b>
<b>III.3.1 La programmation dynamique</b>	<b>29</b>
<b>III.3.2 La méthode de génération de colonnes</b>	<b>29</b>
<b>III.3.3 La méthode par séparation et évaluation (B&amp;B)</b>	<b>29</b>
<b>III.4 Conclusion</b>	<b>31</b>
<b>Chapitre IV : Implémentation et expérimentation</b>	<b>32</b>
<b>IV.1 Introduction</b>	<b>33</b>
<b>IV.2 Interférence</b>	<b>33</b>
<b>IV.3 La fonction objectif (Fitness Function)</b>	<b>34</b>
<b>IV.3.1 Reformulation en mono-objectif</b>	<b>37</b>
<b>IV.4 Les modes de transmissions</b>	<b>37</b>
<b>IV.5 Les contraintes d'optimisation</b>	<b>38</b>
<b>IV.6 Représentation d'un sous problème</b>	<b>39</b>
<b>IV.7 Présentation de l'application</b>	<b>40</b>
<b>IV.7.1 Application du PSO pour l'OFDM</b>	<b>43</b>
<b>IV.7.1.1 Population initiale</b>	<b>43</b>
<b>IV.7.1.2 Ajustement des paramètres</b>	<b>43</b>

<b>IV.7.2 Algorithme B&amp;B pour l'OFDM</b>	<b>44</b>
<b>IV.7.3 Comparaison des résultats obtenus</b>	<b>46</b>
<b>IV.8 Conclusion</b>	<b>48</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>49</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>51</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>54</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>55</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>56</b>

# **Introduction Générale**



# Introduction générale

---

---

En ce début de troisième millénaire, le domaine des réseaux de transmission a connu une profonde évolution. Les systèmes de communications, et plus particulièrement les systèmes de communications sans fil, font partie des technologies qui ont révolutionné notre mode de vie.

Le développement et l'amélioration de nouveaux services de radio communication avec une meilleure qualité et en même temps réduire son impact environnemental est devenue un enjeu pour les chercheurs.

Ce développement condense des risques d'interférences et de saturation du spectre électromagnétique, ce qui rend le spectre encombré.

Pour cela, Les chercheurs développent de nouvelles technologies pour résoudre le problème des espaces libres du spectre. Cette nouvelle technologie est la radio cognitive (RC). La capacité de radio cognitive intégrée à un terminal lui offre la possibilité d'interagir avec son environnement radio afin de s'y adapter, de détecter les fréquences libres et de les exploiter.

La méthode d'accès OFDM a été largement utilisée dans différents types de réseaux. L'objectif principal de ce travail est de fournir une qualité de service acceptable à l'utilisateur secondaire tout en minimisant les interférences avec l'utilisateur principal.

Pour remédier à ce problème, nous avons choisi l'algorithme de séparation et évaluation (B&B) comme méthode exacte. Nous avons aussi comparé son efficacité par des comparaisons avec un méta heuristique qui est l'algorithme de l'optimisation des particules en essaim (PSO).

Ce mémoire est organisé comme suit :

**Dans le premier chapitre** : nous apportons le concept de radio logiciel et de SDR, celle-ci donnant une naissance de radio cognitive, de plus nous présentons en détails les grandes lignes de la RC : l'architecture, les fonctions et les différentes phases de cycle de cognition. Par la suite, nous exposons les différentes techniques de gestion dynamique du spectre.

**Dans le deuxième chapitre** : nous apportons le concept d'OFDM et ses principes de fonctionnement, ainsi les applications courantes de ce type de modulation.

**Dans le troisième chapitre** : Nous présentons les méthodes exactes et les méthodes approchées et en détaillant les méthodes utilisées dans ce rapport, en se focalisant sur leurs fonctionnements.

**Dans le dernier chapitre** : Nous développerons dans la première partie, l'approche utilisée pour résoudre le problème de la qualité de service dans les réseaux cognitive, dans la deuxième partie, nous présenterons notre application avec ses différentes fonctionnalités, par la suite nous présentons nos expérimentations avec une étude comparative et une discussion des résultats obtenus.

# **Chapitre I:**

# **La radio cognitive**

## **I.1 Introduction**

La radio cognitive (RC) fait appel à plusieurs domaines de recherches telles que l'électronique, les télécommunications et l'informatique, cette dernière, constitue la science dont l'apport en algorithmes permet de mettre en place des solutions efficaces pour la prise de décision intelligente, afin d'optimiser la gestion spectrale dans un réseau RC.

Dans ce contexte, la RC peut augmenter l'efficacité spectrale, par le partage opportuniste du spectre de l'utilisateur primaire (UP) avec les utilisateurs secondaires (USs).

Ce chapitre porte sur une présentation précise et détaillée de la RC, où nous décrivons ses composantes, ses fonctionnalités, ainsi que sa frontière avec la radio logicielle.

## **I.2 Radio Logicielle (Software Radio)**

Le concept de radio logicielle, paru en 1991, grâce aux travaux de Joseph Mitola, dans le but de définir une classe de radio communication configurable utilisant des techniques de traitement numérique du signal sur des circuits numériques programmables, et doit également être considéré comme une manière de rendre les usagers, les fournisseurs de services et les fabricants plus indépendants des normes. Ainsi, avec cette solution, les interfaces radio peuvent, en principe, être adaptées aux besoins d'un service particulier pour un usager particulier dans un environnement donné à un instant donné [36]

Les fonctions typiques de l'interface radio généralement réalisées en matériel, telles que la fréquence porteuse, la largeur de bande du signal, la modulation et l'accès au réseau sont réalisés sous forme logicielle, pour répondre aux besoins croissant de performance et l'interopérabilité entre les systèmes hétérogènes.

### **I.2.1 Radio logicielle restreinte (SDR)**

La radio logicielle restreinte qu'on nomme également "Software Defined Radio" ou SDR est un système radio communication qui peut modifier dynamiquement certaines de ses caractéristiques de façon logiciel [17], ainsi il peut modifier sa fréquence porteuse qui va lui permettre de transmettre et recevoir des signaux sur une large bande de fréquence, il peut aussi modifier le type de modulation et le niveau de puissance, et ça en utilisant le même matériel.

Une radio logicielle permettra alors de s'adapter aux caractéristiques : fréquence, bande passante, modulation, ... de n'importe quel standard de radiocommunication.

Les principales fonctions assurées par une radio logicielle sont les suivants [30] :

- **Le support de multistandards :** Une radio logicielle a l’habileté de supporter des normes différentes (par exemple GSM, WiMAX, WiFi). En outre, les différentes versions dans le même standard (par exemple, IEEE 802.11a, 802.11b, 802.11g ou 802.11n en standard WiFi).
- **Le support de multi-service :** Une radio logicielle supporter plusieurs types de services comme téléphonie cellulaire ou accès à Internet.
- **le support de multicanal :** Une radio logicielle a l’habileté de supporter l’émission et la réception sur plusieurs bandes de fréquences simultanément.

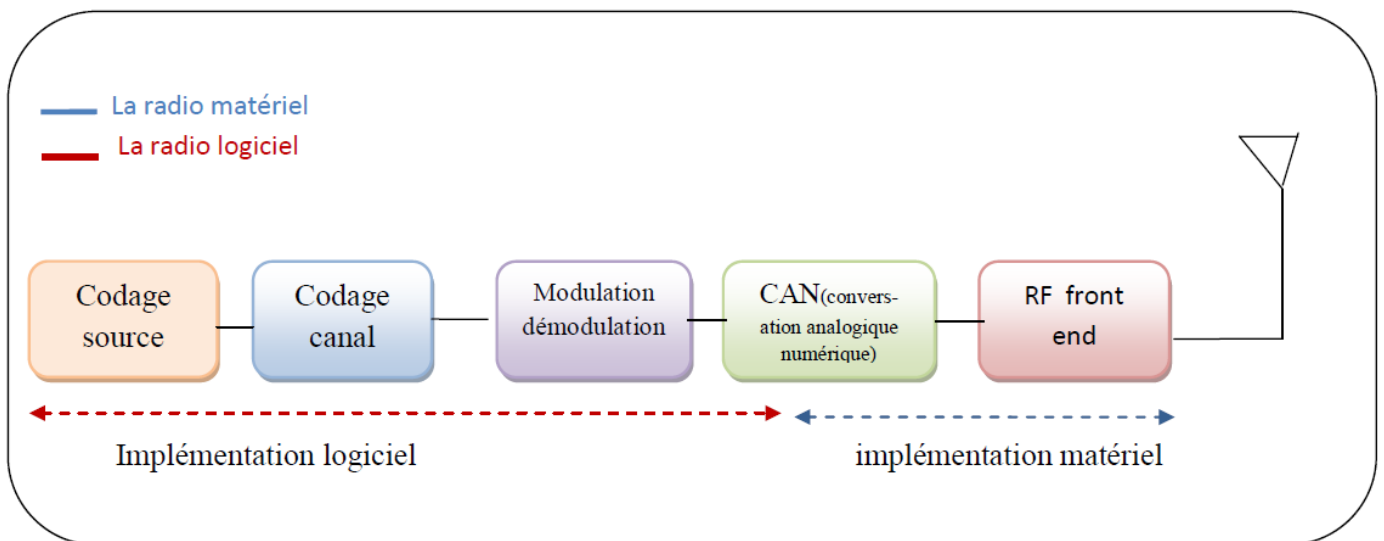


Figure I.1 : Evolution de la radio matérielle à la radio logicielle

## I.3 Radio Cognitive

### I.3.1 Historique

Le concept de la radio cognitive a été présenté officiellement par Joseph Mitola à un séminaire à KTH, l'Institut royal de technologie, en 1998, publié plus tard dans un article de Mitola et Gerald Q. Maguire, Jr en 1999 [27]. Connu comme le « Père de la radio logicielle ». Dr. Mitola est l'un des auteurs les plus cités dans le domaine. Puis vient l'IEEE en 2008 [35] qui ajoute à cette définition l'aspect décisionnel grâce à des données primaires et un objectif prédéfini.

La figure suivante représente les étapes du développement dans la radio cognitive :

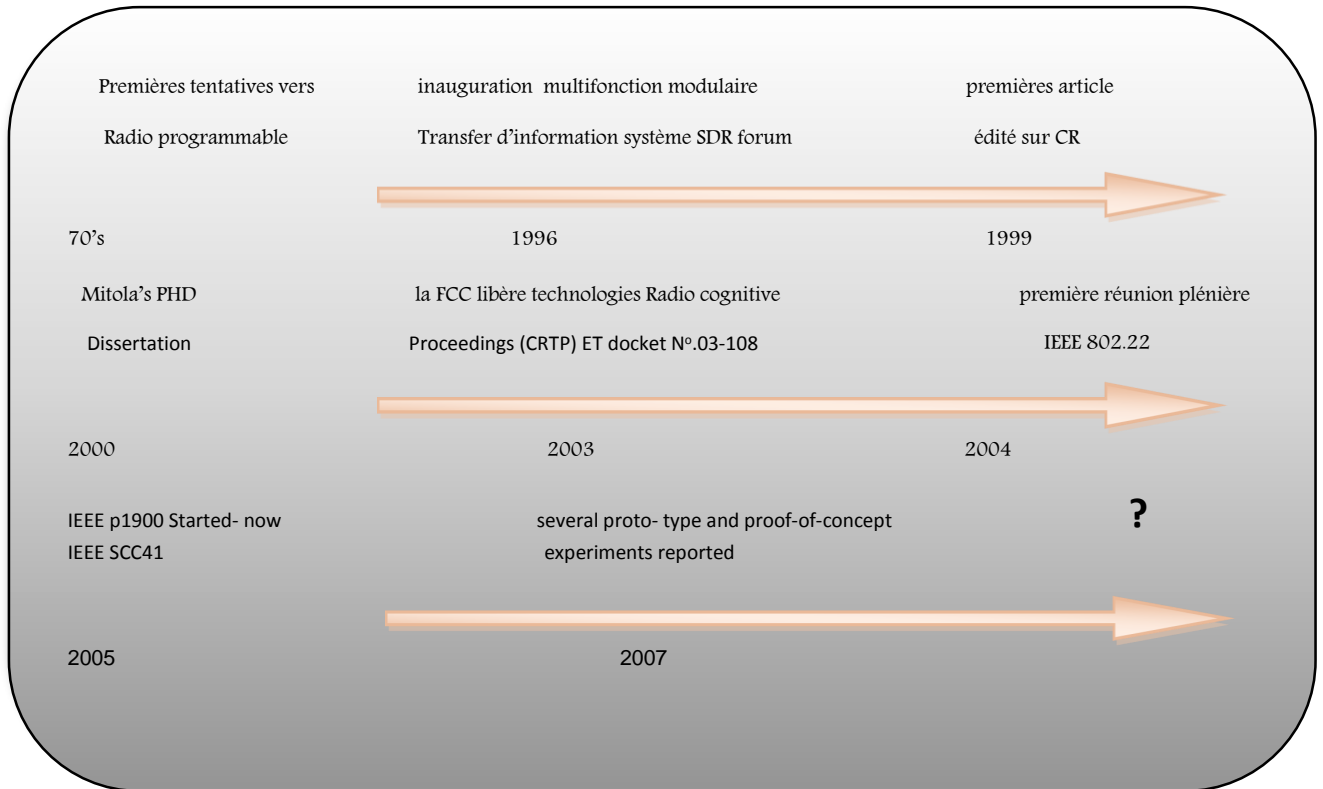


Figure I.2 : Étapes développements dans la radio cognitive [44]

### I.3.2 Définition

D'après la définition de J. Mitola:

« Une radio cognitive peut connaître, percevoir et apprendre de son environnement puis agir pour simplifier la vie de l'utilisateur. » [1].

La radio cognitive est une nouvelle approche des communications sans fil dont les émetteurs et récepteurs radios sont combinés avec des capteurs. En effet, elle est dotée d'une intelligence qui lui permet d'ajuster ses paramètres (fréquence, puissance, modulation, bande passante) en fonction de son environnement, de la position géographique et des besoins de l'utilisateur. Par conséquent, la radio cognitive doit être mise en œuvre autour d'une radio logicielle.

L'objectif de radio opportuniste est donc d'ouvrir les bandes licenciées à ces utilisateurs secondaires sans perturber les communications des terminaux primaires qui sont seuls censés l'occuper [18].

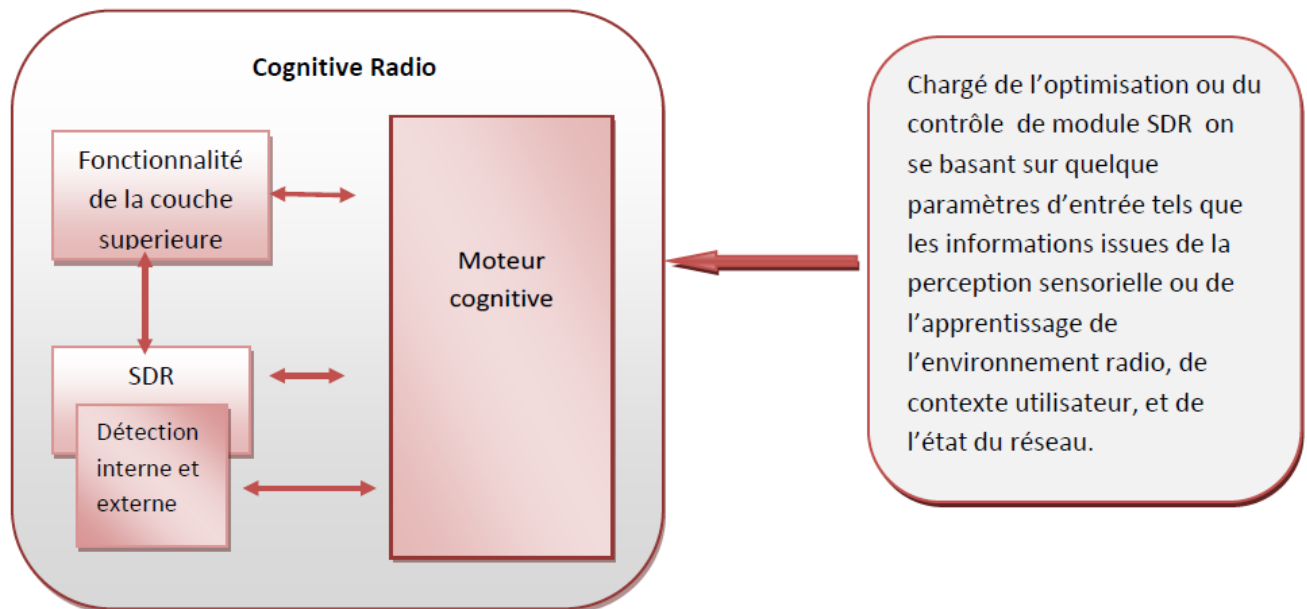
### I.3.3 Relation entre Radio Cognitive et Radio Logicielle

## Restreinte

La radio cognitive (RC) traite un ensemble de caractéristique comme la capacité d'adaptation (bande passante, puissance, modulation, fréquence porteuse), qui peuvent être modifiés en fonction de :

- L'environnement radio.
- L'état du réseau.
- Les besoins de l'utilisateur.
- La situation et La géo localisation.

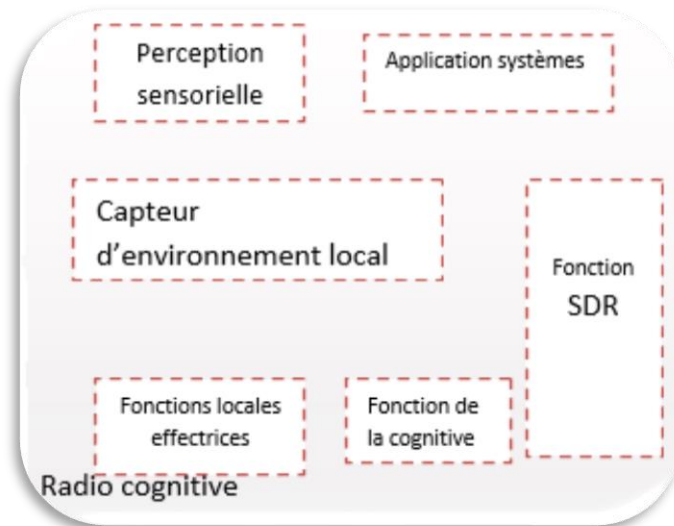
La relation entre la RC et la SDR est définie par un modèle simple qui est représenté dans la figure I.3. Ce modèle représente les éléments de la RC, qui entoure le support SDR et le cognitif engin, ce dernier est nécessaire pour la prise de décision et l'apprentissage de l'environnement radio dans un nuage, qui exploite efficacement les ressources disponibles.



**Figure I.3 : Relation entre radio cognitive et radio logicielle restreinte [29]**

### I.3.4 Architecture de La Radio Cognitive

L'architecture comporte une série de six composantes fonctionnelles, ainsi que les détails de ces éléments [24] :



**Figure I.4 : Architecteur de La Radio Cognitive**

- La perception sensorielle (SP) de l'utilisateur qui intègre l'interface du toucher, l'acoustique, la vidéo et les fonctions de détection et de la perception.
- Les capteurs de l'environnement local (emplacement, température, accéléromètre).
- Les applications système (les services médias indépendants comme un jeu en réseau).
- Les fonctions SDR (qui incluent la détection RF et les applications radio de la SDR).
- Les fonctions de la cognition (pour les systèmes de contrôle, de planification, d'apprentissage).
- Les fonctions locales effectrices (synthèse de la parole, du texte, des graphiques et des affiches multimédias).

### **I.3.5 Cycle de cognition et orientation**

La cognition est dotée d'un cycle qui représente un schéma global d'un ensemble des interactions entre plusieurs modules des systèmes, permettant de contrôler la circulation de l'information dans l'environnement radio. Une telle radio cognitive observe l'environnement, s'oriente, crée des plans, décide, et puis agit. La figure suivant représenter ses activités :

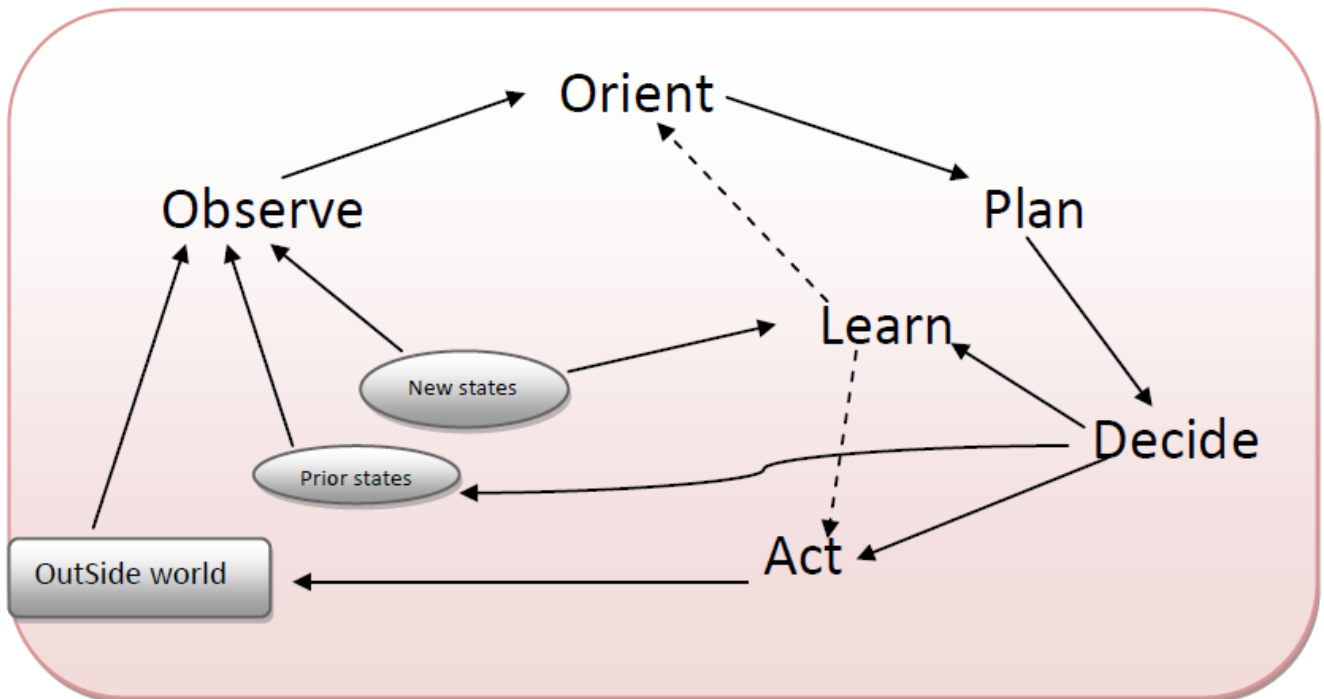


Figure I.5 : Cycle de Cognition [28]

### I.3.6 Les fonctions de la Radio Cognitive

Les principales fonctions de la radio cognitive sont les suivants [11] :

#### I.3.6.1 Détection de spectre (Spectrum Sensing)

C'est la fonction de base, se fait par la détection des espaces blancs (non utilisés) du spectre sans interférence nuisible à autres utilisateurs, la détection d'utilisateur primaire est le moyen la plus efficace pour détecter le spectre libre, ils existent trois techniques [16] de détection du spectre :

- **La détection de l'émetteur primaire :**

Les radios cognitives doivent avoir la capacité de déterminer si un signal d'un émetteur primaire est localement présent dans un certain spectre.

- **La détection du récepteur primaire :**

La méthode la plus efficace pour repérer les trous du spectre, est de détecter les utilisateurs primaires qui reçoivent des données dans la portée de communication d'un utilisateur secondaire, parce la détection coopérative réduit la probabilité d'interférence.

Un signal de « fuite » ou de dérouté émis par le récepteur primaire est exploité. Parce que ce signal est typiquement faible, la mise en œuvre d'un détecteur fiable n'est pas triviale.

- **La gestion des interférences :**

Les interférences sont contrôlées à l'émetteur par la puissance rayonnée et la localisation d'émetteurs individuels. Cependant, l'interférence peut avoir lieu au niveau du récepteur récemment. Un nouveau modèle récemment introduit par la



Fédéral Communication Commission (FCC) a vu le jour, il permet de mesurer la « température d'interférence », ce modèle fixe les interférences au niveau du récepteur par l'intermédiaire d'une limite de température d'interférence, cette variable correspond à la limite maximum qu'un récepteur pourrait tolérer. Ainsi, tant que l'utilisateur secondaire ne dépasse pas cette limite autorisée, il peut utiliser cette bande de fréquence. Néanmoins, la difficulté de ce modèle réside principalement sur la détermination de cette limite.

### I.3.6.2 Gestion du spectre (Spectrum management)

Après la détection de l'ensemble des canaux candidats. Les radios cognitives devraient choisir la meilleure bande de spectre qui répond mieux aux exigences de l'application et qui assure la meilleure qualité de service. Pour faciliter cette tâche, deux classes de fonctions sont mises en place :

- **L'analyse spectrale** : analyser les résultats de la détection du spectre pour estimer la qualité de spectre.
- **Décision spectrale** : après l'analyse spectrale, la décision pour l'accès au spectre est prise, à l'aide d'une modèle de décision, la complexité de ce dernier dépend des paramètres considérés lors de l'analyse du spectre. Ce modèle devient plus complexe quand un utilisateur secondaire a des objectifs multiples.

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 la montre la Figure suivante :

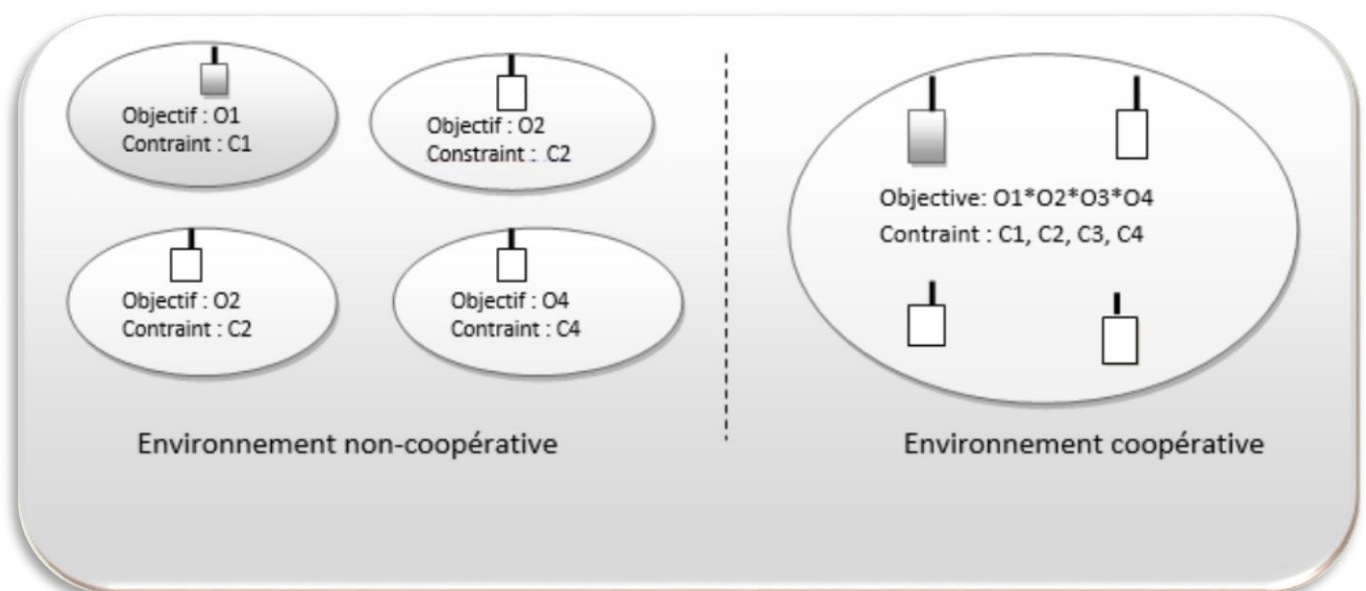


Figure I.6 Accès au spectre Coopératif et non-coopératif [29]

Dans un environnement multi utilisateurs distribué et pour un accès non-coopératif au spectre, chaque utilisateur peut parvenir à une décision optimale de façon indépendante, en observant le comportement (historique / action) des autres utilisateurs du système.

Dans un environnement coopératif, afin d'accéder au spectre et maximiser une fonction objectif commune, les RCs coopèrent les unes avec les autres en tenant compte des contraintes. Dans un tel scénario, un contrôleur central peut coordonner la gestion du spectre.

### **I.3.6.3 Mobilité du spectre (Spectrum mobility)**

Il est défini comme étant le processus par lequel l'utilisateur de la RC change sa fréquence de fonctionnement.

**1. Recherche des meilleures bandes de fréquence disponible :** la RC doit garder une trace des bandes de fréquence disponibles de sorte que si nécessaire, il peut passer immédiatement à d'autre bande de fréquence. Lors de la transmission par un utilisateur secondaire, l'état de bande de fréquences doit être respecté.

**2. Quand un utilisateur secondaire effectue un transfert du spectre, il doit prendre en compte :**

- **Auto-coexistence :** le canal cible ne doit pas être actuellement utilisé par un autre utilisateur secondaire.
- **Synchronisation :** le récepteur de la liaison secondaire correspondant doit être informé de la non-intervention du spectre (la demande de synchronisation).

## **I.4 Réseau Radio Cognitive(RRC)**

Les réseaux radios cognitifs se basent sur des protocoles efficaces de communication. Ces protocoles serviront par la suite à supporter les capacités cognitives [10].

### **I.4.1 L'architecture des Réseaux Radio Cognitive**

Le RRC se décompose en deux réseaux distincts : primaire et secondaire.

#### ➤ **Le Réseau Primaire**

- **Utilisateur Primaire ou Licencié (UP) :** est un utilisateur qui détient une licence qui lui permet d'accéder à certaines bandes spectrales qui lui sont réservées. L'accès est contrôlé uniquement par ses stations de base et ne doit pas subir d'interférence extérieure nuisible.
  - **Station de base des UP :** La station de base des UP est celui qu'on nomme station de base licenciée, c'est une architecture immuable du réseau primaire qui possède une licence pour opérer sur la bande spectrale (par exemple les stations de base des systèmes cellulaires).
- **Le Réseau Secondaire (réseau à accès dynamique, ou bien réseau non licencié) :**

Le réseau secondaire est un réseau qui n'a pas de licence pour opérer sur la bande spectrale. Les réseaux secondaires sont déployés en mode infrastructure ou en mode ad-hoc. Ils se disposent de quatre composants :

- **Un utilisateur radio cognitive (URC) (Utilisateur non licencié ou utilisateur secondaire) :** il n'a pas de licence lui permettant de diffuser sur la bande spectrale. il peut partager la bande spectrale avec les utilisateurs primaires à condition de ne pas nuire leurs transmissions ou bien profiter de leur absence pour transmettre.
- **Station de base secondaire des URC (Station de base non licenciée)** c'est une structure qui est fixé avec des compétences cognitives. L'URC se connecte à la station de base secondaire pour accéder à d'autres réseaux ou services [10].
- **Serveur (Spectrum server) :** Le serveur spectral est une entité du RRC, qu'on utilise pour partager les ressources spectrales entre différents URC dans le même réseau. Ce serveur est connecté à chaque réseau secondaire et opère comme un gestionnaire d'information spectrale [10].
- **Le courtier spectral (Spectrum broker) :** est aussi une entité du RRC qui partage les ressources spectrales entre différents RRC. Ce serveur est relié à plusieurs RRC et agit comme un gestionnaire d'information spectral [10].

➤ **Les types d'accès :**

Les auteurs ont classés différents modèles d'accès à ces réseaux, selon une structure présentée dans [23], cette structure est nommée comme suit :

- **Accès au RRC :** les URC accèdent à leur station de base en se servant des spectres licenciés ou non licenciés.
- **Accès au réseau ad-hoc de radios cognitives :** les URC sont capables de communiquer entre eux à travers des connexions ad-hoc sur des spectres licenciés ou non licenciés.
- **Accès au réseau licencié :** les URC parviennent à la station de base des UP en utilisant les spectres licenciés.

## I.4.2 La gestion spectrale

La gestion du spectre de la radio cognitive se fait sur trois étapes principales qui permet de gérer les ressources spectrales dans les RRC, ces fonctions sont : l'analyse, la décision et la mobilité spectrale.

## I.5 Accès dynamique au spectre

L'accès dynamique au spectre est considéré comme une solution pour résoudre le problème de pénurie de spectre. La radio cognitive permet l'accès aux utilisateurs secondaires à des bandes de fréquences dites vacantes d'une manière opportuniste afin de profiter des espaces blancs dans le spectre et rendre l'usage de ce dernier plus efficace.

Nous allons présenter quelques approches d'accès au spectre accompagnées par des travaux réalisés pour chacune. Nous donnerons plus de détail concernant les méta-heuristiques que nous allons implémenter dans notre travail.

### I.5.1 Accès au spectre en utilisant les enchères

L'enchère est la vente des biens à un ou plusieurs acheteurs qui offrent un prix maximum pendant une durée de temps déterminée par le vendeur, se sont appuyées sur le concept de vente et d'achat des articles réels ou de services.

Il existe plusieurs formes d'enchères, notamment [1] :

Enchères anglaises : enchère publique au premier prix ascendante.

- Enchères hollandaises : enchère publique au premier prix descendante.
- Enchères scellée au premier prix.
- Enchères scellée au second prix : (Vickrey).

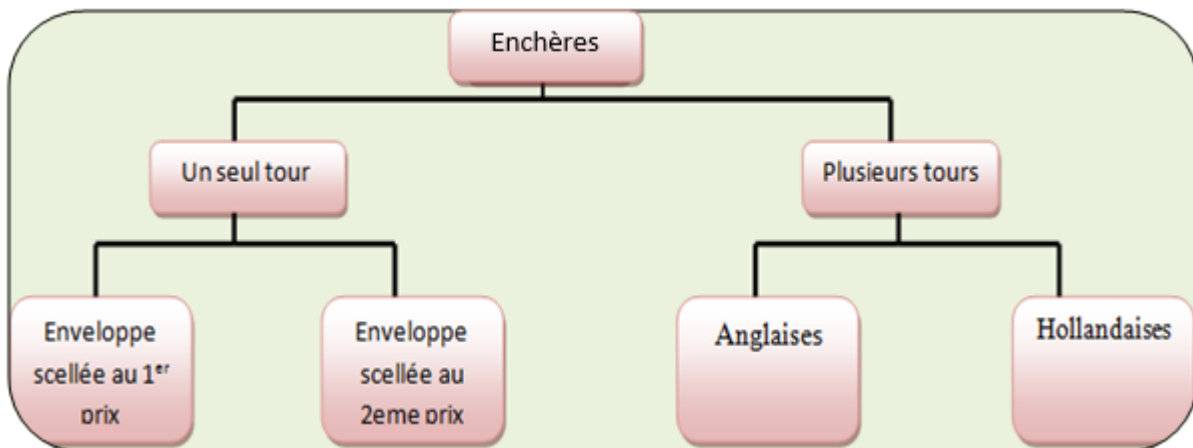


Figure I.8 : Organigramme représentant les types d'enchères

### I.5.2 Accès au spectre en utilisant la Théorie des jeux

La théorie des jeux a connu un essor considérable dans les recherches scientifiques, grâce à son efficacité et son exactitude dans la modélisation des comportements des individus, et la prévision des résultats en fonction des conditions initiales et des décisions prises. Ces jeux sont fréquemment divisés en deux types [33] : jeux coopératifs et jeux compétitifs.

### I.5.3 Accès au spectre en utilisant les chaînes de Markov

Les approches de la théorie des jeux ne modélisent pas le modèle théorique pour ce qui concerne l'interaction entre les utilisateurs secondaires et primaires pour l'accès au spectre. Cette modélisation peut être réalisée en utilisant parfaitement les chaînes de Markov [35].

Les chaînes de Markov ont la capacité de modéliser les interactions entre les utilisateurs primaires et les utilisateurs secondaires [9]. Un principe est proposé dans [49] : chaque utilisateur secondaire, au lieu d'échanger des messages de contrôle avec les utilisateurs voisins, il sélectionne aléatoirement sa propre chaîne. Lors de notre recherche biographique, nous avons trouvé peu de travaux effectués avec les chaînes de Markov. Selon [7], le problème d'accès opportuniste au spectre peut être modélisé comme une chaîne de Markov à temps continue, les auteurs ont proposé deux modèles pour l'accès au spectre : un modèle avec file d'attente et l'autre sans file d'attente, ces modèles permettent de prédire le comportement d'accès au spectre.

### I.5.4 Accès au spectre en utilisant les méta-heuristiques

Les méta-heuristiques visent à résoudre des problèmes d'optimisation difficiles généralement issus des domaines de la recherche opérationnelle, de l'ingénierie ou de l'intelligence artificielle. Elles sont utilisées comme des méthodes génériques peuvent optimiser une large gamme de problèmes différents, leur capacité à optimiser un problème à partir d'un nombre minimal d'informations et contrebalancée par le fait qu'elles n'offrent aucune garantie quant à l'optimalité de la meilleure solution trouvée.

Les algorithmes génétiques (GA), la méthode d'optimisation par essaim particulière (PSO), la recherche Tabou... sont des méta-heuristiques les plus utilisées. La figure suivante illustre un panorama de ces algorithmes [7]. Parmi ces méta-heuristiques, un intérêt particulier a été porté à la méthode PSO, pour résoudre le problème, dans lequel on a défini plusieurs fonctions objectives, que l'on cherche à minimiser (ou maximiser) par rapport à l'ensemble des paramètres.

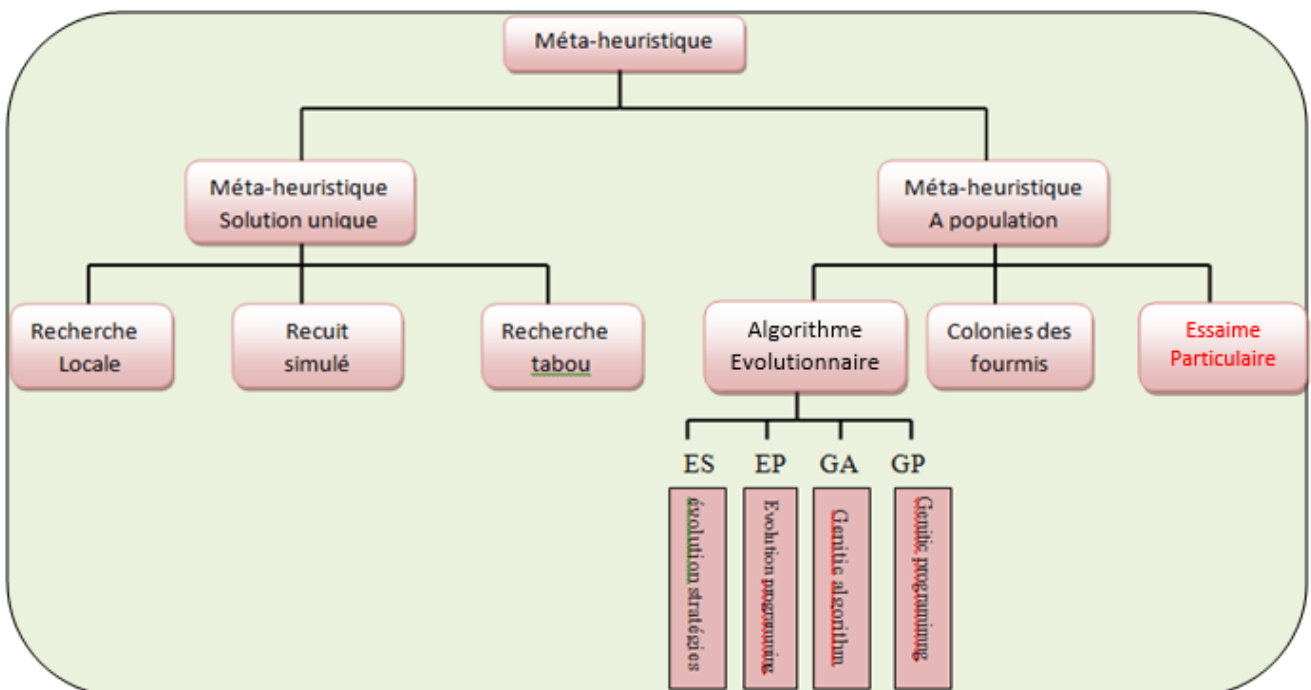


Figure I.9 : Les Classes des méta-heuristiques

## I.6 Domaines d'application de la Radio Cognitive

Parmi les domaines d'application de la radio cognitive, on peut citer :

➤ **Les réseaux sans fil de prochaine génération :**

La radio opportuniste (RC) permet de résoudre le problème de spectre, en plus, il est apparu comme une technologie clé pour la future génération des réseaux sans fil hétérogènes.

➤ **Coexistence de différentes technologies sans fil :**

La RC est considérée comme une résolution qui offre la coexistence de multiples technologies sans fil.

IEEE 802.22 est basée sur les utilisateurs WRAN dont l'objectif est d'utiliser efficacement la bande de fréquence TV, quand il n'y a pas d'utilisation du téléviseur à proximité, ou quand une station de télévision ne diffuse pas.

➤ **Services de cyber santé (e Health services) :**

Dans l'objectif d'améliorer l'efficacité de la prise en charge des patients et la gestion des soins de santé, différents types de technologies sans fil sont adoptés dans les services de santé ; où, plusieurs dispositifs biomédicaux utilisent la transmission RF. L'utilisation du spectre par ces dispositifs doit être choisie avec soin afin d'éviter toute interférence avec l'autre. Dans ce cas, les concepts de la radio cognitive peuvent être appliqués.

➤ **Réseaux d'urgence**

Ils peuvent profiter des concepts de la radio cognitive pour fournir la fiabilité de communication sans fil.

➤ **Réseaux militaire**

Avec la radio cognitive, les paramètres de la communication sans fil peuvent être adaptés de manière dynamique en fonction du temps, l'espace et la mission des soldats.

## I.7 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons vu en détails les concepts de la RC et sa frontière avec la radio logicielle, ainsi que ses composantes et ses fonctionnalités, ensuite nous avons présenté les diverses techniques d'accès dynamique au spectre.

# **Chapitre II :**

# **OFDM (Multiplexage par division de fréquences orthogonales)**

## II .1 Introduction

La RC peut augmenter l'efficacité spectrale, car elle permet à US de partager de façon opportuniste le spectre avec UP. Suite à cela se pose le problème de l'insertion de la densité spectrale de puissance(PSD) de l'US dans la bande de fréquence qui a été ainsi détectée.

L'étape de modulation est un maillon essentiel dans une chaîne de transmission et son optimisation permet de garantir un certain degré de performance. Donc le choix de la modulation destinée à transporter ces données doit être donc fait avec beaucoup de soin. Nous distinguons deux familles de modulation : les modulations mono porteuses et multi porteuses [3].

Actuellement, de plus en plus de solutions sont basées sur des schémas de transmissions multi porteuses du fait de leur excellente robustesse vis-à-vis des canaux à trajets multiples.

Parmi ces solutions multi porteuses possibles, la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) se pose comme une solution de référence [4]. Dans [34], il est montré que ce type de solution peut être adapté au contexte de la RC.

La différence principale entre les différentes techniques classiques de modulations multi porteuses et l'OFDM est que cette dernière autorise un fort recouvrement spectral entre les porteuses. Cela permet d'augmenter sensiblement le nombre de porteuses et d'améliorer l'efficacité spectrale [6].

## II .2 Historique d'OFDM

L'idée d'envoyer des données modulées en parallèle, en utilisant plusieurs fréquences porteuses, n'est pas récente. Le concept de modulations multi porteuses a pour origine celui du multiplexage fréquentiel (FDM), et il a beaucoup d'intérêt et a été proposée pour beaucoup d'autres applications. Au fin des années 50, Les premiers systèmes de modulation multi porteuse sont apparus, et a été utilisée dans des systèmes de communications hautes fréquences militaires, tels que les systèmes Kineplex, ANDEFT et KATHRYN[2, 12,22]

Par la suite, des chercheurs s'intéressent à la modulation multi porteuses, et après quelque année d'études, le concept du multiplexage par division de fréquence orthogonale (OFDM) est né. En 1966, R. W. Chang a proposé le premier schéma d'un système OFDM [31], à l'aide des conditions d'orthogonalité qui sont mise en évidence. Cela aurait permis aux spectres des sous-porteuses respectives de se chevaucher, en optimisant ainsi la bande occupée du signal émis [45].

Quelques années plus tard, l'OFDM a été développé dans les travaux de Chang et Gibby en 1968 [41], tel qu'ils améliorent ce concept en introduisant la notion de signaux orthogonaux à bande limitée [20]. Après, l'OFDM a défini plusieurs développements au fil du temps :

Weinstein et Ebert en 1971 [43], ces deux chercheurs simplifient le schéma de modulation/démodulation en utilisant la transformée de Fourier discrète inverse (TFDI) à



l'émetteur et TFD au récepteur, plus simple à utiliser et surtout plus facile à implémenter sous forme d'algorithme rapide [8].

Puis, ce concept était développé par Peled et Ruiz en 1980 [31], le problème de chevauchement en réception de plusieurs versions retardées du signal émis entraînait d'une part l'interférence entre symboles successifs ISI, et d'autres parts l'interférence entre porteuses ICIce problème pousse Peled et Ruiz à proposer l'ajout d'un intervalle de garde cyclique (CP : Cyclic Prefix) où la fin du signal OFDM est recopiée dans l'intervalle de garde [19].

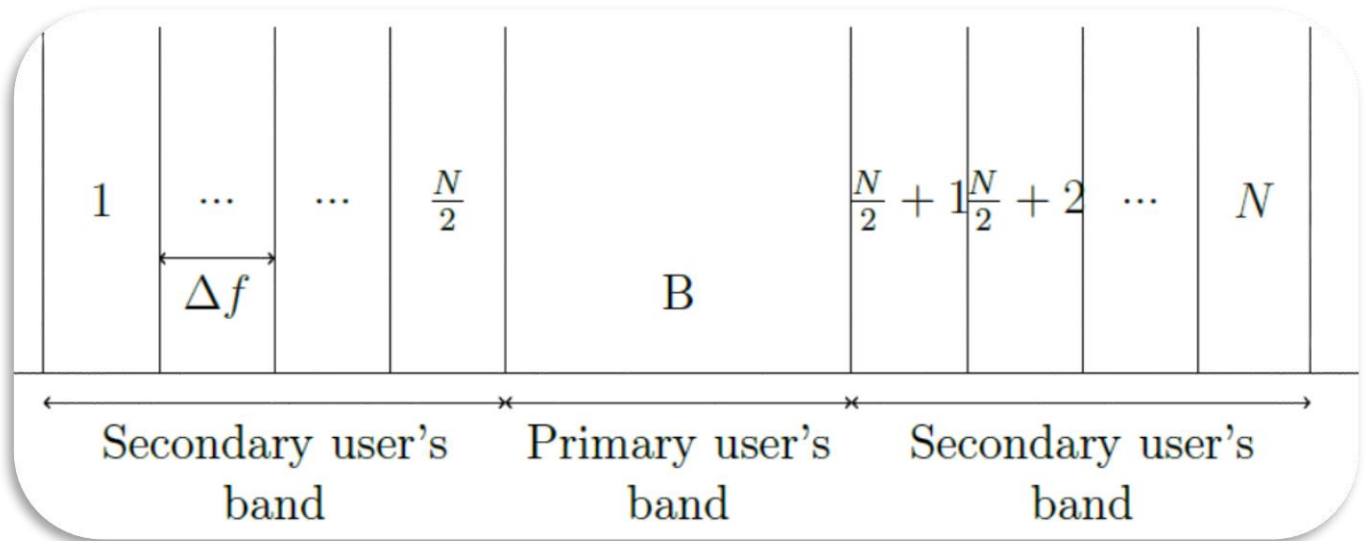
Plus récemment en 1997, d'autres travaux sur cet aspect de systèmes OFDM ont également démontré que la transformée d'Hadammard pouvait remplacer le banc de modulateurs [11].

Les ouvrages suivants [2,31,8,22,48] présentent la modulation OFDM. Les deux premiers présentent la théorie et les applications de l'OFDM ; le troisième ouvrage détaille le fonctionnement de l'OFDM et le quatrième ouvrage décrit le design d'un système OFDM et cherche à mettre en avant les différences entre l'OFDM et le système MC-CDMA. Le dernier ouvrage offre une vision générale sur les concepts de base, l'optimisation des performances ainsi que les problèmes liés à l'OFDM.

### **II .3 Définition d'OFDM**

*« L'OFDM est utilisé dans tous les systèmes radios numériques récents (télévision, radio, réseaux cellulaires), ainsi que dans les systèmes filaires (ADSL, transmission sur courant porteur). »*

Il consiste à envoyer les données en parallèle sur un très grand nombre de sous-porteuses. Ce traité montre comment une telle transmission se fait simplement à partir de transformées de Fourier et comment est obtenue l'orthogonalité entre sous-porteuses.



**Figure II .1: Le scénario de coexistence des UP et US dans le système de communication multi porteur [42]**

Le principe de l'OFDM consiste à répartir le signal numérique que l'on veut transmettre, sur un grand nombre de sous-porteuses. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (des émetteurs, par exemple) indépendants et à des fréquences différentes.

## II .4 Notions d'orthogonalité

Mathématiquement, l'orthogonalité de deux fonctions  $F_1(t)$  et  $F_2(t)$  dans l'intervalle  $[a,b]$ [45]

$$\int_a^b F_1(t).F_2(t).dt = 0 \quad (II.1)$$

Cela signifie que ces deux fonctions sont disjointes sur le segment  $[a,b]$ .

On distingue deux types d'orthogonalité :

### ➤ L'orthogonalité temporelle

Envisageons tout d'abord des signaux continus, donc non encore échantillonnés. Dans ce cas, un signal OFDM est composé d'une somme de  $N$  sinusoïdes de fréquences respectives  $f_k$  transmises durant une durée  $T_u$ ,  $k$  variant de 0 à  $N - 1$ , et définit par  $f_k = k / T_u$ , cette condition permet d'avoir un nombre entier de sinusoïdes sur chaque sous-porteuse durant  $T_u$ . Chaque sous-porteuse  $s_k(t)$  réelle et non modulée peut se mettre sous la forme :

$$s_k(t) = \begin{cases} \sin(2\pi \frac{k}{T_u} t), & 0 < t < T_u \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases} \quad \text{Pour } k \in [0, N-1] \quad (II.2)$$

Ainsi deux sous-porteuses  $s_k(t)$  et  $s_{k+1}(t)$ , de fréquences respectives  $f_k$  et  $f_{k+1}$ , définies par l'expression (II.2), sont orthogonales sur l'intervalle  $[0, \tau_u]$ , puisqu'elles vérifient l'équation (II.1) [45].

➤ **L'orthogonalité fréquentielle**

On peut aussi percevoir la notion d'orthogonalité du signal OFDM dans le domaine fréquentiel. En effet, si chaque sous-porteuse  $s_k(t)$  est transmise pendant la durée  $T_u$ , cela revient à appliquer à la sous-porteuse une porte de durée  $T_u$ , dont l'enveloppe spectrale est un sinus cardinal qui s'annule aux premières fréquences  $f_k - \frac{1}{T_u}$  et  $f_k + \frac{1}{T_u}$ , dont ces deux fréquences sont aussi respectivement égales à  $f_{k-1}$  et  $f_{k+1}$ . On obtient ainsi l'enveloppe spectrale représentée par la figure II .2, le spectre (a) étant celui d'une sous porteuse  $k$ , de bande  $\Delta f = \frac{1}{T_u}$  et le spectre (b) celui du signal OFDM à  $N = 4$  sous-porteuses et, qui s'étale sur  $B = N \cdot \Delta f = \frac{N}{T_u}$ .

L'orthogonalité dans le domaine fréquentiel est réalisée puisque le maximum de chaque sous porteuse correspond à un « zéro » des autres. Cette condition permet ainsi d'avoir une occupation spectrale idéale et d'éviter les interférences entre sous-porteuses.[45]

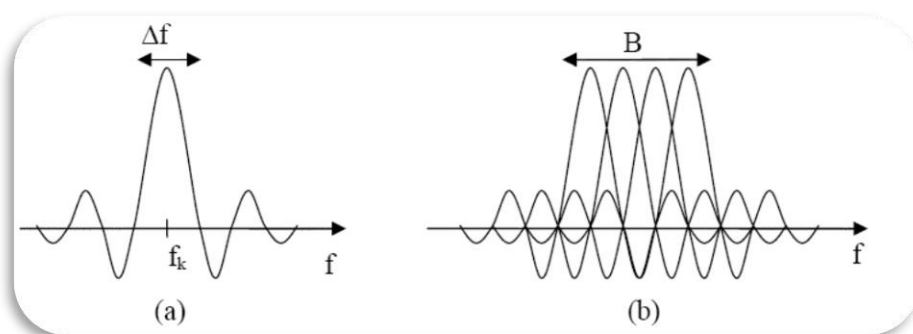
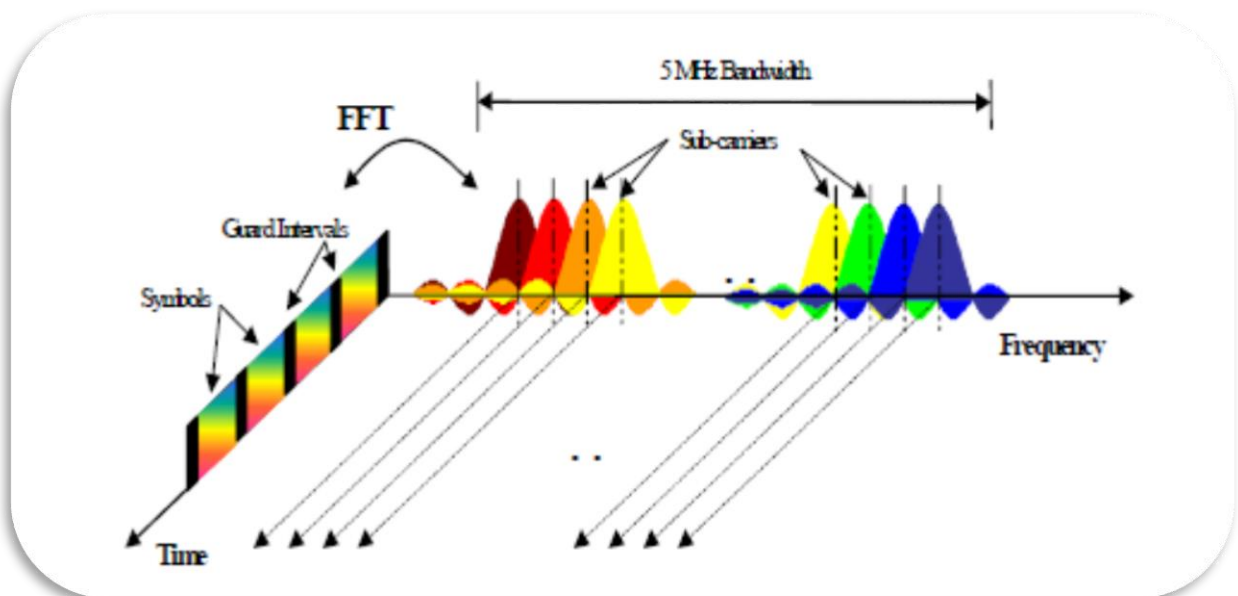


Figure II .2 (a) Spectre d'une sous-porteuse et (b) Spectre d'un signal OFDM [40]

**II .5 Principe de l'OFDM**

Pour émettre un signal, la technique de l'OFDM consiste à diviser une plage de fréquence en plusieurs sous-canaux séparés par des zones libres de tailles fixes. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission indépendants et à des fréquences différentes tel qu'un préfixe cyclique (Intervalle de Garde) ajouté au début du symbole et ce préfixe est identique au segment de même longueur à la fin du symbole. La longueur de cet intervalle est choisie de façon à être supérieure à la valeur maximale de délai dû à l'effet de trajet multiple.

Pour que les fréquences des sous-porteuses soient les plus proches possibles et pour transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre eux. Comme le montre la **Figure II .3.**



**Figure II .3: Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM [39]**

## II .6 Applications courantes de la modulation OFDM

Grâce à la robustesse et à la fiabilité de la modulation OFDM, elle est actuellement employée dans différentes normes telles que la radio numérique DAB [14], la télévision numérique terrestre DVB-T[13], ainsi que pour les réseaux locaux à l'intérieur des bâtiments de type BRAN [15], les réseaux locaux sans fil IEEE 802.11 et HyperLan2 [15], l'OFDM est adoptée aussi pour les réseaux ATM sans fils.

Dans ce mémoire, nous proposons d'utiliser la modulation OFDM dans le contexte de la RC. Cette modulation présente l'avantage de pouvoir générer un système orthogonal tout en utilisant une forme d'onde bien localisée en temps et en fréquence.

## **II.7 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre le concept d'OFDM et ses principes de fonctionnement, ainsi les applications courantes de ce type de modulation.

# **Chapitre III :**

# **Méthodes de résolution**

# **exacte et approchée**

## III .1 Introduction

Un Problème d'Optimisation Combinatoire (POC) peut être issu de l'industrie théorique suivant le contexte, celui qui étudie ce problème doit se demander de quel temps d'étude il dispose, de l'intérêt induit par cette étude mais aussi du cadre (machine, temps de calcul,...) dont il dispose pour résoudre les instances de ce problème, d'autre concernant la solution cherchée, qui peut être une solution exacte ou approchée.

Cela a poussé les chercheurs à développer de nombreuses méthodes de résolution en recherche opérationnelle et en (IA) [25].

Il existe un très grand nombre de méthodes de résolutions des problèmes d'optimisation combinatoire et elles sont classées en deux grandes catégories :

Les méthodes exactes et les méthodes approchées

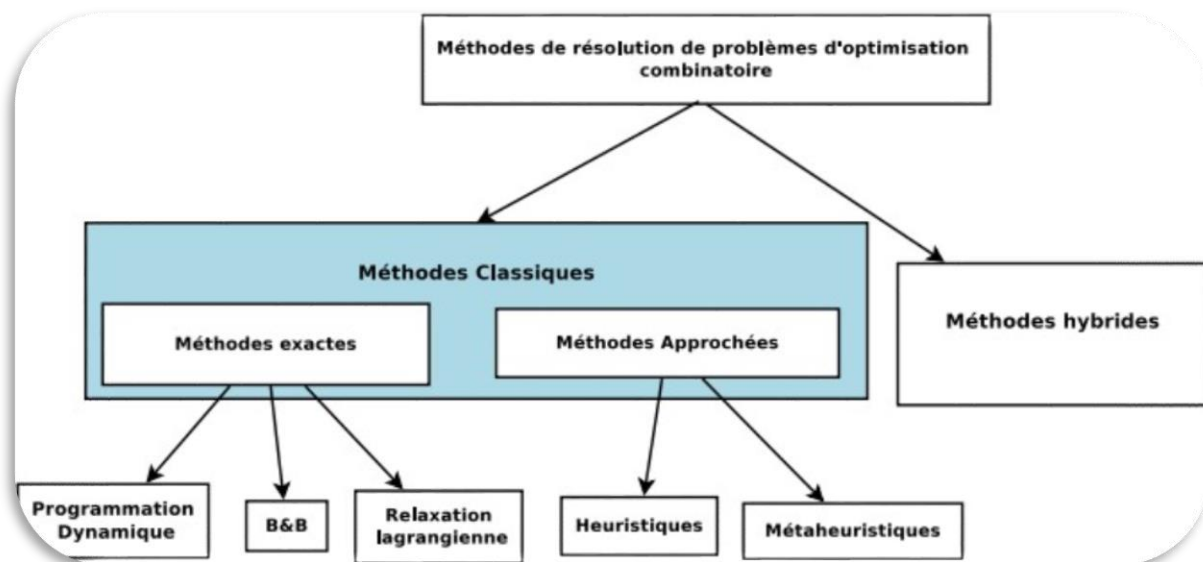


Figure III .1 Classification des méthodes d'optimisation.

## III .2 Méthode de résolution approchée

Comme son nom l'indique, la méthode de résolution approchée est une méthode qui permet l'obtention d'une solution approchée d'un problème donné, dans un temps de calcul raisonnable, il améliore l'efficacité d'un processus de recherche, en sacrifiant éventuellement l'exactitude ou l'optimalité de la solution. On distingue deux grandes classes de méthodes :

### III .2.1 Les heuristiques (spécifiques)

C'est une méthode simple et d'usage général. Son principe est de choisir à chaque étape des solutions qui paraissent localement optimales à la base d'un critère glouton,

L'objectif est de choisir des solutions localement optimales pour atteindre à la fin une solution globalement optimale, cette algorithmes parcourt une seule branche de l'arbre et ne fait jamais du back tracking (pas de retour arrière).

La difficulté d'une approche gloutonne réside dans la correction du choix glouton (prouver qu'il est optimal).

Nous citons les méthodes de MARANZANA (1964) et celle de Teitz et Bart (1968). Ces méthodes sont efficaces même pour des problèmes de taille exponentielle.

### **III .2.2 Les méta-heuristiques**

Les méta-heuristiques sont utilisées pour résoudre les problèmes de grande taille. Ces algorithmes sont plus complets et plus complexes qu'une simple heuristique, et permettent généralement d'obtenir une solution de très bonne qualité pour des problèmes issus des domaines de la recherche opérationnelle, dont on ne connaît pas de méthodes efficaces pour les traiter, ou bien quand la résolution du problème nécessite un temps élevé ou une grande mémoire de stockage.

Parmi ces méthodes, nous distinguerons :

#### **III .2.2.1 Le recuit simulé**

Le recuit simulé est parmi les premières méta-heuristiques qui ont été proposées, il a été mis au point par trois chercheurs de la société S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt et M.P. Vecchi en 1983, et indépendamment par V. Černý en 1985.

Le recuit simulé est un algorithme basé sur une heuristique permettant la recherche de solutions à un problème donné. Il permet notamment d'éviter les minima locaux, mais nécessite un réglage minutieux des paramètres.

#### **III .2.2.2 L'algorithme PSO (Particule Swarm Optimisation)**

L'optimisation par essaim particulaire (OEP), ou Particule Swarm Optimisation (PSO) en anglais, est basée sur les « interactions sociales » entre des « agents » appelés « particules », dans le but d'atteindre un objectif donné dans un espace de recherche commun où chaque particule a une certaine capacité de mémorisation et de traitement de l'information. Cette méta-heuristique d'optimisation stochastique a été proposée en 1995 par James Kennedy socio-psychologue et Russell Eberhart ingénieur électricien.

##### **III .2.2.2.1 Mode de fonctionnement de l'algorithme PSO**

Le déplacement de toute particule est régi par des règles et conditions bien spécifiques, influencé par le mouvement des autres particules du voisinage. Dans un tel contexte, ce déplacement a une signification et doit parallèlement répondre à une logique, fondement même du PSO. Chacune de ces composantes reflète une partie de l'équation.

Il consiste à chercher un optimum dans un voisinage donné, ce déplacement est influé par les trois composantes suivantes :

**1) La composante d'inertie** : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.



2) **La composante cognitive** : la particule tend à se diriger vers la meilleure position rencontrée jusqu'à présent.

3) **La composante sociale** : la particule s'inspire également de l'expérience, du parcours des autres particules, pour se diriger vers la meilleure position rencontrée par ses voisins.

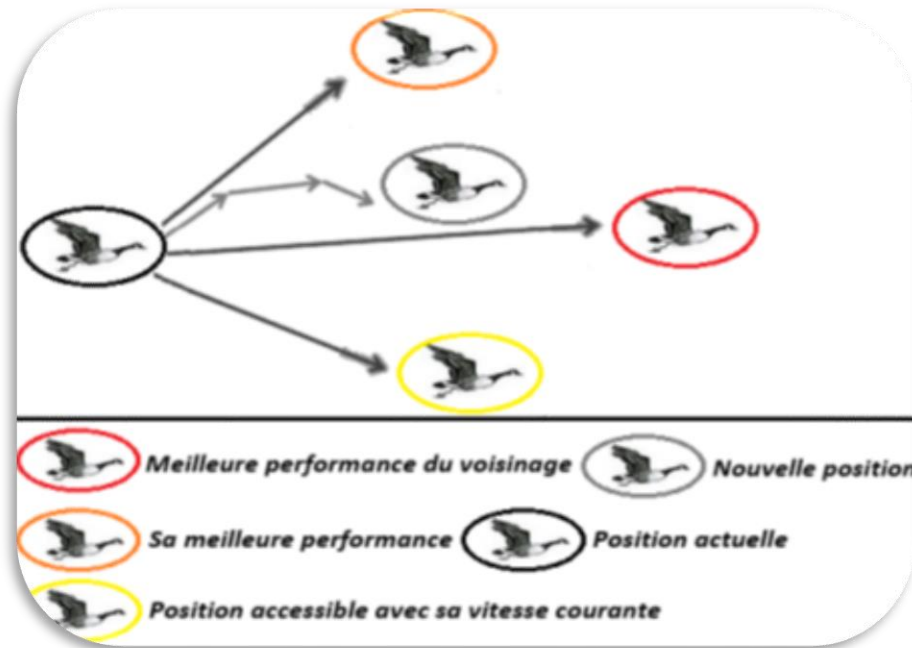


Figure III.2 : Déplacement d'une particule.

### III .2.2.2.2 Organigrammes PSO standard

Les étapes de cet algorithme sont expliquées dans ce qui suit :

Au début, on part d'un ensemble initial d'individus « initialisation de population », qui est généré de façon aléatoire dans l'espace de recherche.

Par la suite, afin de mettre à jour les valeurs de *gbest* et *lbest*, leurs fitness des particules sont calculées à chaque itération, puis *gbest* et *lbest* sont mises à jours.

Chaque particule de l'essaim est définie par sa vitesse de déplacement ( $u_k$ ) dans un espace de recherche entre les itération  $T$  et  $T+1$ , et il est capable d'évaluer la qualité de sa position qu'elle a atteinte et il sera dirigé après par l'attraction vers la meilleure position qu'elle a trouvé jusqu'à présent, appelé personnel best (*lbest*), et par l'attraction vers la meilleure position trouvée par les autres particules (soit tous particules, soit un voisinage locale), appelée globale best (*Gbest*).

La population vole dans un espace de recherche à base des deux équations suivantes [26] :

$$\begin{cases} u_k = u_{k-1} + c_1 * \text{rand}() * (y_{k|lbest} - y_k) + c_2 * \text{rand}() * (y_{gbest} - y_k) \\ y_k = y_{k-1} + u_k \end{cases}$$

où  $y_k$  et  $u_k$  sont respectivement la position et la vitesse de la particule dans chaque itération,  $Ibest_k$  : la meilleure position obtenue par la particule,  $gbest_k$  : la meilleure position obtenue par l'essai (tous les particules).

De plus,  $c_1$ ,  $c_2$  sont deux constantes qui représentent les coefficients d'accélération,  $rand()$  : nombre aléatoire tiré de l'intervalle  $[0,1]$ .

Ce mécanisme va se répéter jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit vérifié.

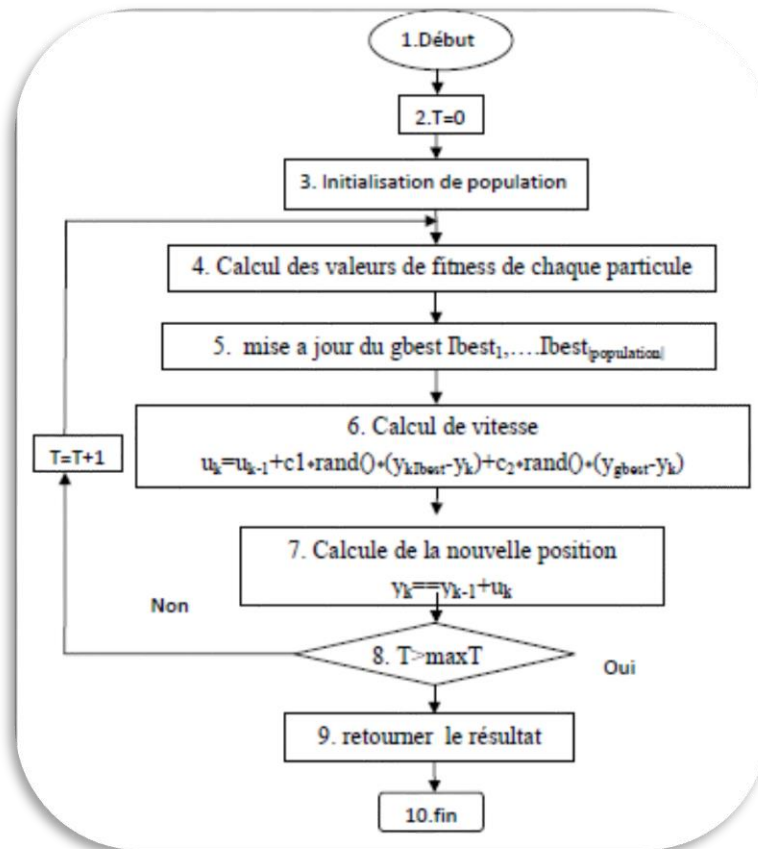
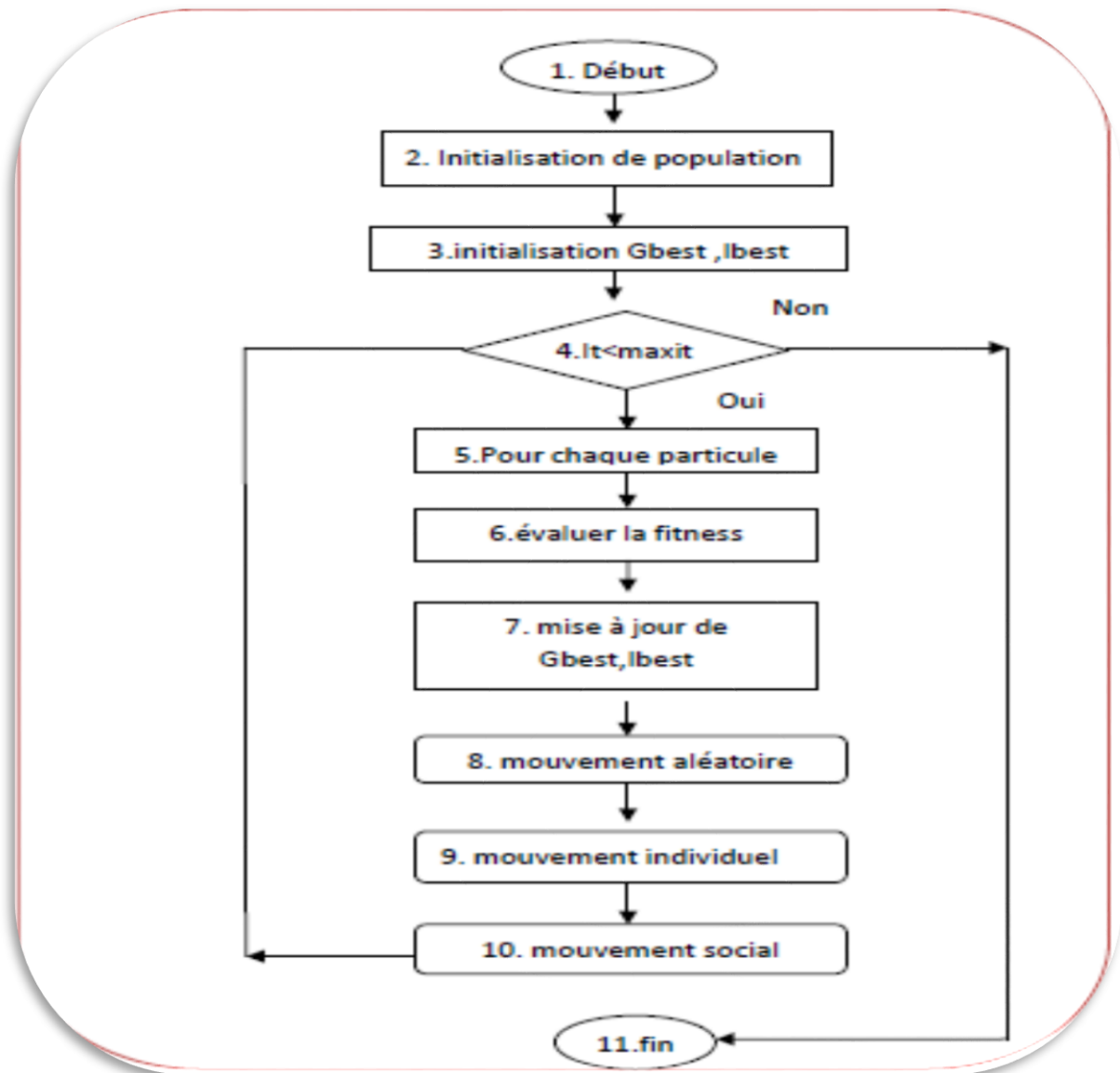


Figure III. 3 : Organigramme standard de PSO

### Organigramme PSO discret

Les étapes de cet algorithme sont résumées dans l'organigramme présenté dans la figure suivante :



**Figure III. 4 : Organigramme discret de PSO**

Les étapes de cet algorithme sont expliquées dans ce qui suit :

**Étape 1** : Initialiser chaque vecteur de particule de l'essaim aléatoirement dans l'espace de recherche.

**Étape 2** : initialiser les valeurs de *gbest* de la population et *lbest* de chaque particule.

**Étape 3** : Appliquer l'algorithme PSO et calculer la fitness de chaque particule en utilisant la fonction objectif.

**Étape 4** : Mettre à jour les valeurs de *gbest* et *lbest* des particules.

**Étape 5**: Appliquer le mouvement aléatoire par exemple : Si la valeur initiale de  $X_i = \{(0.12, 2, 1), (1.21, 1.0), (2.02, 2, 1), (0.98, 1, 1)\}$  , alors en changeant le 3eme canal par la valeur partielle du  $X_{gbest} = (2.23, 3, 0)$  , la nouvelle valeur du  $X_i$  sera  $X_i = \{(0.12, 2, 1), (1.21, 1.0), (2.23, 3, 0), (0.98, 1, 1)\}$  ,

**Étape 6** : Appliquer le mouvement individuel sur le 2eme canal par exemple  $X_i = \{(0.12, 2, 1), (1.21, 1.0), (2.23, 3, 0), (0.98, 1, 1)\}$  , avec  $(1.21, 1.0) \in X_{lbest}$

**Etape 7 :** Appliquer le mouvement social sur le 4eme canal par exemple  $X_i = \{(0.12, 2, 1), (1.21, 1.0), (2.23, 3, 0), (0.98, 1, 1)\}$  avec,  $(0.98, 1, 1) \in X_{gbest}$

**Etape 8 :** Arrêter la recherche si la condition d'arrêt (*itération* < *max itération*) est vérifiée et afficher la meilleure solution *gbest* Sinon, retourner à l'étape 3.

### **III.3 Les méthodes de résolution exactes**

Les méthodes de résolution exactes explorent l'espace de recherche de manière exhaustive et permettent de trouver la solution exacte d'un problème d'optimisation combinatoire.

Ces méthodes sont très connues par le fait qu'elles nécessitent un coût de recherche souvent prohibitif en termes de ressources requises. En effet, le temps de recherche ou l'espace mémoire nécessaire pour l'obtention de la solution optimale peut être exponentielle.

Il existe de nombreuses algorithmes exacts y compris l'algorithme du simplexe, la programmation dynamique, l'algorithme A\*, les algorithmes de séparation et évaluation (Branch and Bound, Branch and Cut, Branch and Price et Branch and Cut and Price), les algorithmes de retour arrière (Backtracking), La méthode de la génération de colonnes.

Nous présentons dans notre travail la méthode de programmation dynamique et La méthode de génération de colonnes, et nous détaillant la méthode de séparation et d'évaluation (Branch and Bound).

#### **III.3.1 La programmation dynamique**

C'est un paradigme de conception d'algorithmes introduit en 1950 par Richard Bellman, elle est Basée sur le principe d'optimalité de Bellman :

La solution optimale de quelques problèmes s'appuie sur les solutions optimales de leurs sous problèmes.

Cette approche consiste à résoudre les sous problèmes une seule fois et enregistre sa solution optimale (aspect de mémorisation). Ensuite résoudre ces sous-problèmes et combiner leurs solutions afin de trouver une solution globale.

#### **III.3.2 La méthode de génération de colonnes**

Les algorithmes de génération de colonnes sont utilisés pour des problèmes linéaires de grande taille. La formulation a été initialement proposée par Ford et Fulkerson en 1958[32]. L'objectif de cette méthode est de résoudre un problème réduit avec un ensemble limité de variables. Le principal avantage de la génération de colonnes est qu'il n'est pas nécessaire d'énumérer toutes les possibilités. Au lieu de cela, Le problème initial est appelé problème maître, et le problème réduit est appelé problème restreint. Ce problème comporte le moins de variables possible, et de nouvelles variables sont introduites dans la base, en cas de besoin. En plus, si une colonne avec un coût réduit négatif peut être trouvée, elle est ajoutée au problème restreint et ce processus est répété jusqu'à ce qu'aucune autre colonne ne puisse être ajoutée au problème restreint.

#### **III.3.3 La méthode par séparation et évaluation (B&B)**

##### **Présentation de l'algorithme**



**Le principe de séparation**

Il se base sur la technique «Diviser pour régner ». Elle consiste à dissocier le problème en sous problèmes de manière à représenter le problème sous forme d'une arborescence. En résolvant tous les sous problèmes et en prenant la meilleure solution trouvée, on est assuré d'avoir résolu le problème initial. Ce principe de séparation est appliqué de manière récursive à chacun des sous-ensembles tant que celui-ci contient plusieurs solutions.

La procédure de séparation d'un ensemble s'arrête lorsque l'un des critères est vérifiée

- on connaît la meilleure solution de l'ensemble.
- on connaît une solution meilleure que toutes celles de l'ensemble.
- on sait que l'ensemble ne contient aucune solution admissible.

**La stratégie de parcours :****➤ La profondeur d'abord**

Cette stratégie privilégie les sommets les plus éloignés de la racine (de profondeur la plus élevée), Cette voie mène rapidement à des solutions approchées.

**➤ Le meilleur d'abord**

Permet de favoriser l'exploration des sous problèmes possédant la meilleure borne. Elle permet aussi d'éliminer tous les sous-problèmes qui possèdent une mauvaise évaluation par rapport à la valeur optimale.

**➤ La largeur d'abord**

Cette stratégie est moins efficace que les deux autres stratégies, elle permet de favoriser les sous-problèmes (les sommets) obtenus par le moins de séparations du problème initial, c'est-à-dire les sommets les plus proches de la racine (de profondeur la moins élevée).

## **III.4 Conclusion**

Ce chapitre est divisé en deux parties, la première consacrée aux méthodes approchées, un intérêt particulier a été porté à la méthode d'optimisation par essaim particuliaire(PSO), et la deuxième partie interprète les méthodes exactes précisément la méthode B&B qu'on a utilisé dans notre travail.

# **Chapitre IV : Implémentation et expérimentation**

## IV.1 Introduction

La résolution de problème d'adaptation de lien par utilisateur secondaire lors de l'adoption de la fréquence orthogonale d'un réseau de radio cognitif basé sur le multiplexage de divisions (OFDM) constitue un axe de recherche qui a sollicité l'attention de plusieurs équipes de recherche, et dans le cadre de problématique de la radio cognitive la majorité des algorithmes utilisés sont des méta-heuristiques. Dans ce travail on s'intéresse à une méthode exacte qui est la méthode d'évaluation et séparation (B&B) pour la modulation multi porteuse OFDM. Puis, on a utilisé l'algorithme de l'optimisation des particules en essaim (PSO) pour établir une étude comparative selon différents critères, tels que le temps de traitement, le résultat obtenu.

## IV.2 Interférence

L'accès opportuniste au spectre crée les parties sous-utilisées du spectre sous-utilisé pour la réutilisation, à condition que les transmissions des radios secondaires ne causent pas de brouillage préjudiciable aux utilisateurs principaux. Un tel système exigerait que les utilisateurs secondaires soient cognitifs, ils doivent détecter avec précision et réagir rapidement aux diverses utilisations du spectre. Il est donc important de caractériser l'effet de l'interférence cognitive du réseau due à une telle réutilisation secondaire du spectre.

La contribution d'interférence du  $i^{eme}$  canal de la US dans la bande d'utilisateur primaire est obtenue par l'intégration du spectre de densité de puissance correspondant au  $i^{eme}$  canal définit par l'équation suivante dans la bande d'utilisateurs primaires, donc formulée comme suit [42] :

$$I_i(d_i, P_i) = \int_{d_i - \beta/2}^{d_i + \beta/2} |g_i|^2 \phi_i(f) df$$

$I_i(d_i, P_i)$  est la contribution aux interférences du canal mentionné pour une puissance de transmission  $P_i$ ,  $d_i$  est la distance spectrale entre le  $i^{eme}$  canal et la fréquence centrale de la bande UP,  $\beta$  est la bande passante du UP, et  $g_i$  est le gain de canal de la station de base à l'unité UP.

$\phi_i(f)$  Représente la densité spectrale de puissance (PSD) du  $i^{eme}$  sous porteuse dans la bande de l'utilisateur RC, l'expression est décrite avec l'équation suivante :

$$\phi_i(f) = P_i T_s \left( \frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2$$

Où  $P_i$  correspond à la puissance d'émission attribuée au  $i^{eme}$  canal de la bande de l'utilisateur secondaire alors que  $T_s$  est la durée du symbole.

De façon analogue, l'interférence générée dans le  $i^{eme}$  canal de l'US par le signal de l'UP est formulée comme suit :



$$J_i(d_i) = \int_{d_i - \Delta f/2}^{d_i + \Delta f/2} |h_i|^2 \phi_{pu}(e^{jw}) dw$$

Où  $J_i$  correspond à cette interférence de la contribution de signal de UP, alors que  $h_i$  est le gain de canal de la station de base à l'unité US, et  $\phi_{pu}(e^{jw})$  est le PSD (densité de puissance de signal) du signal principal de l'utilisateur.

Les paramètres utilisés pour calculer l'interférence sont initialisé comme suite :

La durée du symbole OFDM est  $T_s = 0.001s$

La bande passante de l'UP est de 5 Mhz.

La fréquence intermédiaire est 650 Mhz.

La bande passante du US est 5Mhz divisée en 16 sous porteuse, avec huit sous porteuses dans chaque côté de la bande passante du UP. Donc La bande passante de chaque sous porteuse est 312 Hz.

Interférence maximale tolérable pour le PU est de 0,004 W.

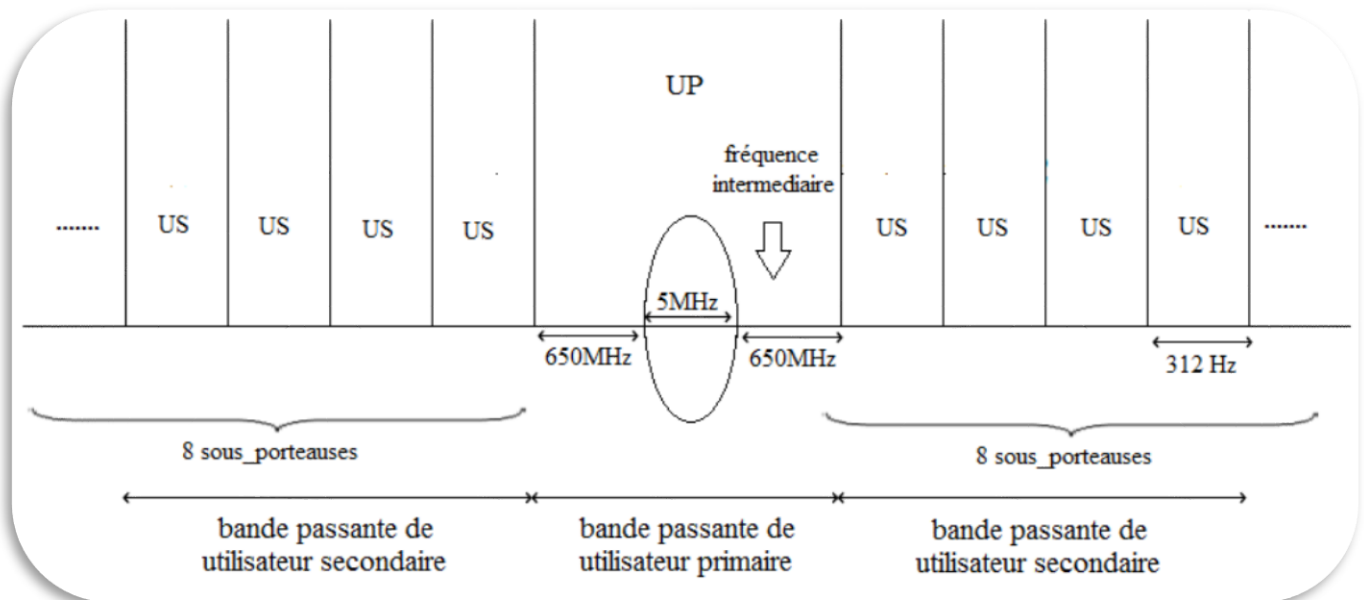


Figure IV.1 : Les valeurs des bandes passantes de UP et US

### IV .3 La fonction objectif (Fitness Function)

La fonction objectif (de l'anglais fitness function), permet de résoudre un certain type de problème d'optimisation statique ou dynamique, mono ou multi objectif. Dans notre étude la fonction objectif doit représenter le problème d'adaptation de lien par utilisateur secondaire lors de l'adoption de la fréquence orthogonale réseaux de radio cognitif basé sur le multiplexage de divisions (OFDM).

Le principal problème ici est de fournir une haute qualité de service(Qos) aux USs (utilisateurs secondaires) dans les réseaux cognitifs. De ce fait, quand un utilisateur secondaire veut utiliser un spectre, il doit d'abord connaître l'état interne de son système (économie d'énergie, performance élevée...) et aussi externe (les autres utilisateurs, atténuation du signal), et doit pouvoir s'adapter en modifiant ses paramètres (puissance de transmission, type de modulation) en fonction du contexte.

Les trois critères principaux, qui sont prise en charge dans les systèmes de télécommunication et qui sont appliqués dans ce travail :

- Minimisation du taux d’erreur.
- Maximisation du débit.
- Minimisation de la consommation d’énergie.

La fonction objectif doit définir ces trois critères, et la présentation mathématique de ces critères sont illustrés dans le tableau suivant : [42]

Fonction	
Minimiser le temps d’erreur	$1 - \frac{\log_{10}(0.5)}{\log_{10}(\overline{P_{be}})}$
Maximisation de débit	$\frac{\log_2(\overline{M})}{\log_2(M_{max})}$
Minimisation de la consommation d’énergie	$1 - \frac{\overline{P}}{P_{max}}$

**Tableau IV .1 : Représentation mathématique des trois critères**

Pour calculer le taux d’erreur ( $P_{be}$ ) sur les canaux, il existe divers types de fonctions qui sont spécifiques pour chaque type de modulations utilisées :

Type de modulation	$P_{be}$
BPSK	$Q\left(\sqrt{\frac{P_i}{N}}\right)$
M-ary PSK	$\frac{2}{\log_2(M)} Q\left(\sqrt{2 * \log_2(M) * \frac{P_i}{M} * \sin \frac{\pi}{N}}\right)$
M-ary QAM	$\frac{4}{\log_2(M)} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q\left(\sqrt{\frac{3 * \log_2(M) P_i}{M - 1 N}}\right)$

**Tableau IV.2 : Taux d’erreur sur les différents types de modulation [46]**

Les trois fonctions montrées utilisent la fonction  $Q(x)$ , qui représente la fonction d’erreur de Gauss, approximation de cette fonction représente [47] :

$$Q(x) = \frac{e^{-\frac{x^2}{2}}}{1.64x + \sqrt{0.76x^2 + 4}}$$

Les différents paramètres de ces fonctions sont définis dans le tableau suivant :

Variables	définition
$P_i$	La puissance du signal sur la sous-porteuse $i$
$N$	Le nombre de porteuses
$P_{max}$	La puissance maximale qu'on peut transmettre une seule sous-porteuse
$M$	L'index de modulation
$M_{max}$	L'index de modulation maximal
$\overline{P_{be}}$	Le taux d'erreur moyen sur $N$ canaux
$N$	Le taux d'atténuation
$I$	L'index d'interférence
$I_{max}$	L'index d'interférence maximal

**Tableau IV .3 : Définition des différents paramètres**

La qualité de service dans les réseaux de radio cognitive est définie par une fonction objectif qui doit comporter trois critères (minimisation de taux d'erreur, maximisation de débit, minimisation de la consommation d'énergie.

L'objectif	Paramètre associés
Minimisation du taux d'erreur	$P \nearrow, N \searrow, M \searrow$
Maximisation du débit	$M \nearrow$
Minimisation de la consommation d'énergie	$P \searrow$

**Tableau IV .4 : Influence des différents paramètres**

### IV.3.1 Reformulation en mono-objectif

Afin de résoudre les problèmes d'optimisation multi-objectifs, il est très courant de reformuler ces derniers sous forme d'un problème d'optimisation mono-objectif où l'on cherche à maximiser la qualité d'un ensemble de solutions compromis. Cette reformulation se fait à travers la définition d'une fonction objectif unique  $f$ , qui représente la somme pondérée des différentes fonctions objectifs comme le montre l'équation suivante :

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i$$

Les poids  $w_1, w_2 \dots w_n$  doivent satisfaire les deux contraintes suivantes :

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad , 0 < w_i < 1$$

D'après l'étude [46], la fonction objectif résulte de la somme pondérée des trois fonctions, ainsi, chacune de ces trois fonctions est associées à un poids pour déterminer l'importance accordée à chaque objectif, la somme de tous ces poids est égale à 1.

$$\text{Fonction objectif} = \begin{cases} \mathbf{P_1 * fonction de minimisation de taux d'erreur+} \\ \mathbf{P_2 * fonction de maximisation du débit+} \\ \mathbf{P_3 * fonction de la minimisation de la consommation} \end{cases}$$

$$\sum_{i=1}^3 P_i = 1 \text{ avec } P_i \in [0,1]$$

### IV.4 Les modes de transmissions

La qualité de service a comme objectif d'optimiser l'utilisation de spectre en fonction de la demande de l'utilisateur, il peut par exemple avoir besoin d'une utilisation intensive de la bande passante dans trois mode, le cas d'une utilisation carrément multimédia (mode multimédia), il peut aussi vouloir économiser la batterie (mode batterie faible), ou bien éviter les erreurs de transmission dans le cas d'une application critique (mode urgence).

Un mode de transmission peut être vu comme une association de poids aux différents objectifs de la radio, donnant ainsi à la fonction la plus importante un poids élevé, la fonction qui est en conflit avec la fonction principale recevra un poids faible, tandis que la fonction qui ne les pas, recevra un poids intermédiaire.

Le tableau suivants défini les trois cas :

Mode de transmission	Poids		
	Taux d'erreur	Débit	Consommation
Mode urgent	0.80	0.05	0.15
Mode multimédia	0.05	0.80	0.15
Mode batterie faible	0.15	0.05	0.80

**Tableau IV.5 : Poids associé aux différents modes de transmission**

Les différents poids sont utilisés pour constituer les fonctions objectifs de chaque mode de transmission :

**a- Mode urgence :**

$$\text{Fonction Objectif} = (0.80 * F_{\text{min taux d'erreur}}) + (0.05 * F_{\text{max débit}}) + (0.15 * F_{\text{min consommation}})$$

**b- Mode multimédia :**

$$\text{Fonction Objectif} = (0.05 * F_{\text{min taux d'erreur}}) + (0.80 * F_{\text{max débit}}) + (0.15 * F_{\text{min consommation}})$$

**c- Mode batterie faible :**

$$\text{Fonction Objectif} = (0.15 * F_{\text{min taux d'erreur}}) + (0.05 * F_{\text{max débit}}) + (0.80 * F_{\text{min consommation}})$$

## IV.5 Les contraintes d'optimisation

Compte tenu de l'existence de l'UP, la fonction objectif donnée est optimisée sous réserve de deux contraintes [42]:

- Une contrainte sur la puissance totale de transmission de l'US :

$$\sum_{n=1}^N P_n \leq P_{max}$$

- Une Contrainte sur l'interférence maximale tolérable de l'UP :

$$\sum_{n=1}^N I_{n(d_n, P_n)} \leq I_{max}$$

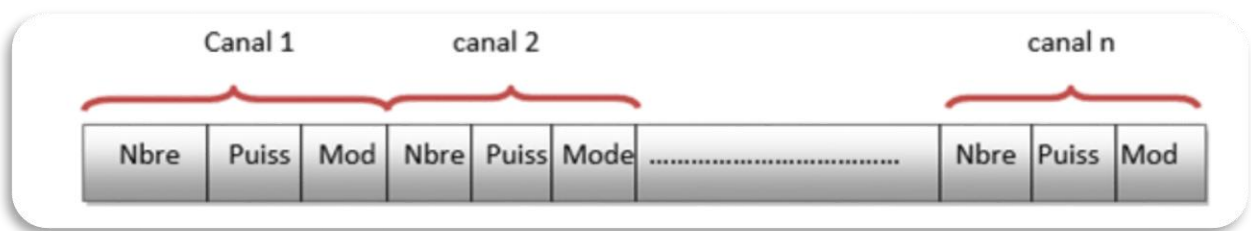
Avec  $d_i$  est la distance entre l'UP et l'US

$I_{n(d_n, P_n)}$  est l'interférence donnée pour une puissance de transmission  $P_n$  dans la bande UP et  $I_{max}$  est l'interférence maximale tolérée par l'utilisateur primaire.

## IV.6 Représentation d'un sous problème

Dans ce travail, on a besoin de trois paramètres qui sont liés directement aux différents modes de transmissions, il y a principalement la puissance du signal et les divers types de modulations qui permettent de maximiser le débit ou minimiser le taux.

Typiquement, pour chaque canal on a besoin d'une puissance et d'un type de modulation, la forme d'une solution ou d'un individu est comme suit :



**Figure IV.2 : Structure d'une particule**

➤ **Puissance**

L'intervalle de puissance qu'on a utilisé, correspond à 25 valeurs, de 0.2 à 5 mW avec un incrément de 0.2 mW.

➤ **Modulation**

Pour la simulation, nous avons utilisé un seul type de modulation : PSK (Phase Shift Keying).

➤ **Nombre de bit**

Chaque type de modulation a plusieurs index (nombre de byte par symbole) qui correspond à l'intervalle :  $2^i$  avec  $i \in [2...5]$ .

➤ **Atténuation (taux de bruit) :**

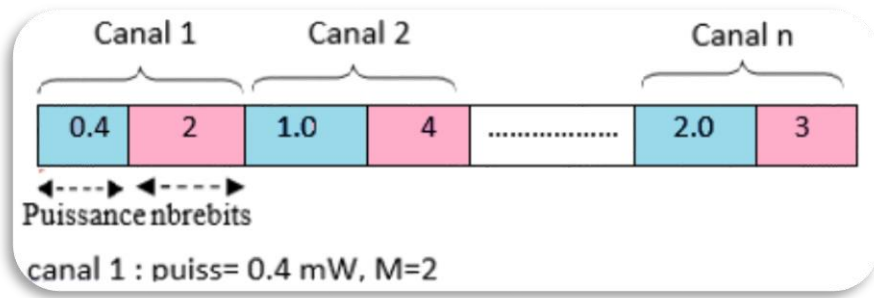
Pour simuler un environnement multicanal dynamique, une valeur d'atténuation aléatoire égale à 0.1 a été attribuée pour chaque canal.

➤ **Codage**

Il y a deux types de codage (binaire et réel), d'après les différentes études la plupart se sont dirigées vers le codage binaire [46], bien que de nouvelles études ont montrées la puissance et la rapidité du codage réel [38]. Nous allons étudier la performance de codage réel avec un nombre de canal dynamique.

• **Représentation réel :**

La figure IV.3 représente un exemple de codage réel, chaque canal contient trois parties chacune correspondant à une puissance, type de modulation et le nombre de bits :



FigureIV.3 : Exemple de codage réel

- Codage réel de la puissance :

Le codage de chaque puissance est présenté dans le tableau suivant :

<b>Valeur</b>	1	2	3	4	5	6	.....	22	23	24	25
<b>puissance</b>	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	.....	4.4	4.6	4.8	5

Tableau IV.6 : codage réel de la puissance

- Codage réel de la modulation

<b>Valeur</b>	0
<b>modulation</b>	PSK

TableauIV.7 : Codage réel de la modulation

- Codage de nombre de bits

<b>Valeur</b>	2	3	4	5
<b>nombre de bits</b>	4	8	16	32

Tableau IV .8: Codage réel de nombre de bits

### IV.7 Présentation de l’application

Nous avons proposé une application codée en java par l’outil « NetBeans », cette application a été pensée pour être facile à configurer, ainsi presque toute la configuration peut se faire à partir de la fenêtre principale.



FigureIV.4 : Interface d'accueil

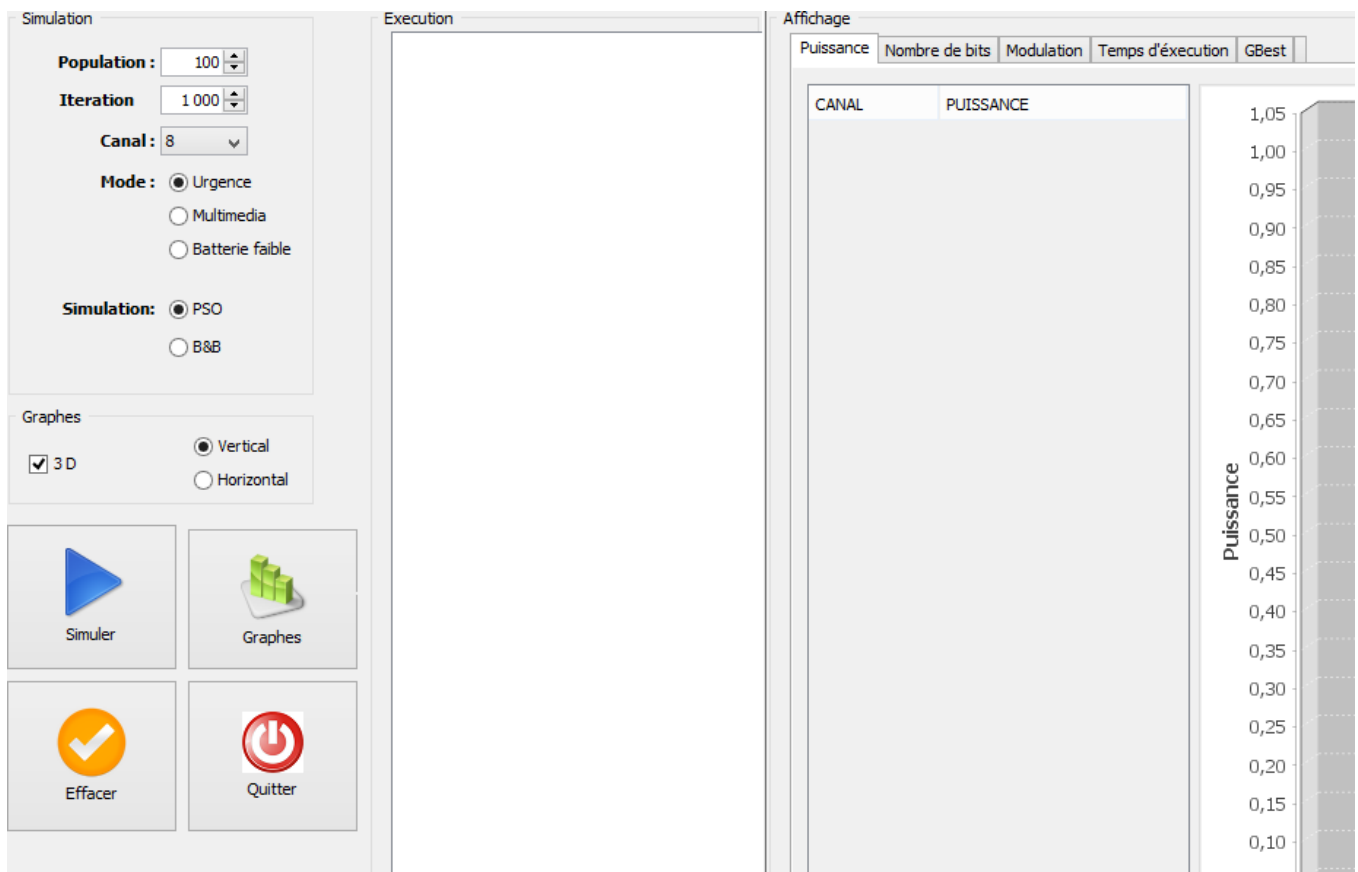


Figure IV.5 : fenêtre principale.

Dans notre application et dans l'étape de configuration, on trouve pour le premier panel « Simulation » le choix des différents paramètres : La taille de population, le nombre des itérations, le nombre des canaux et le type de l'algorithme PSO ou B&B.



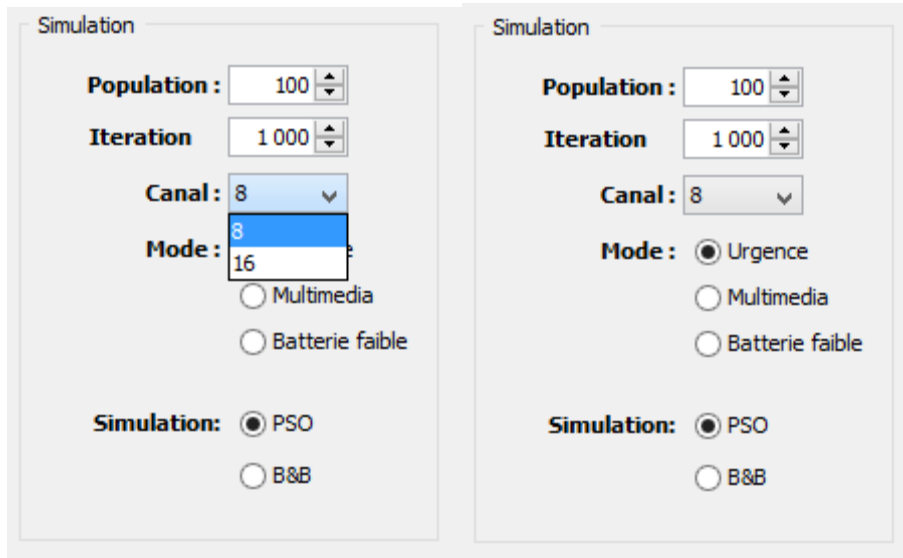


Figure IV.6 : panel simulation.

Après la simulation d'application, nous avons générer des histogrammes (2D et 3D) pour tous les caractéristiques de canaux (puissance, nombre de bits) pour la Meta heuristique et pour chaque mode de transmission.

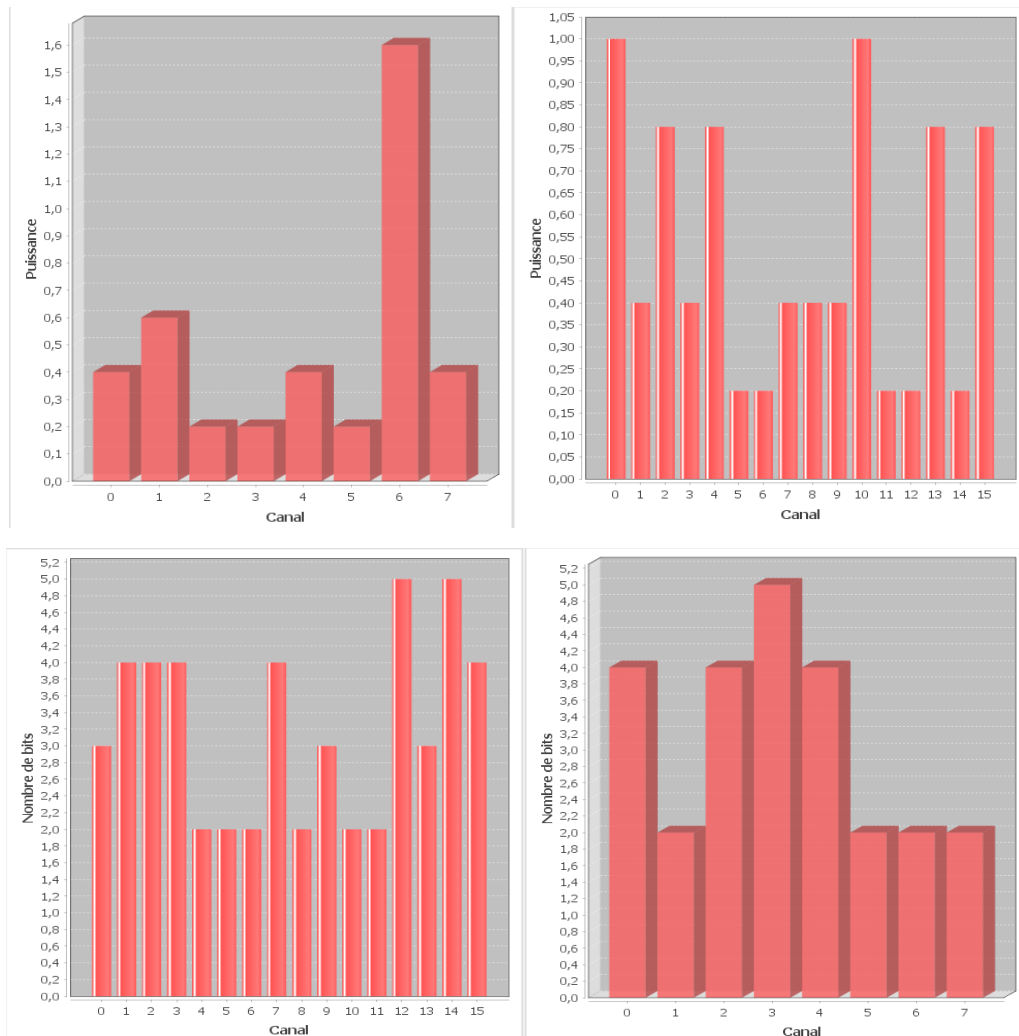


Figure IV.7 : Histogrammes des caractéristiques de canaux

### IV.7.1 Application du PSO pour l'OFDM

Avant d'appliquer cet algorithme, nous avons choisi une population initiale, en plus nous avons ajusté un ensemble de paramètres pour chaque problème. Ces paramètres permettent une convergence efficace et rapide vers la meilleure solution.

#### IV.7.1.1 Population initiale

Le choix de la population initiale est généralement initialisé de façon aléatoire et uniforme, et sa taille est le seul paramètre mis en jeu.

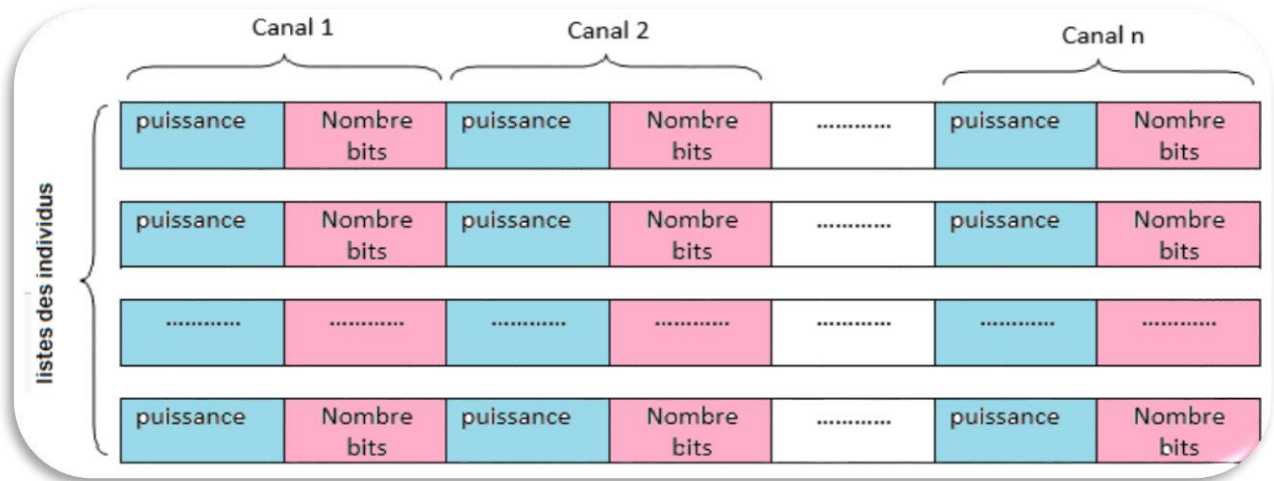


Figure IV .8 : Liste des individus

#### IV.7.1.2 Ajustement des paramètres :

Suite à plusieurs expériences, ou nous avons varié le nombre de populations avec un pas de 20, nous avons constaté qu'avec 100 populations l'algorithme PSO produit des résultats intéressants en termes d'optimalité, pour tous les modes de transmission (urgent, MultiMedia, batterie faible). Les différentes exécutions obtenues sont illustrés à travers la **figure VI.9**

Concernant le nombre d'itérations, deux conditions d'arrêt ont été considérées : le meilleur résultat reste inchangé durant 100 itérations, ou bien le nombre d'itérations dépasse 1000.

Ces paramètres sont utilisés durant toutes les comparaisons avec la méthode Branch & Bound.

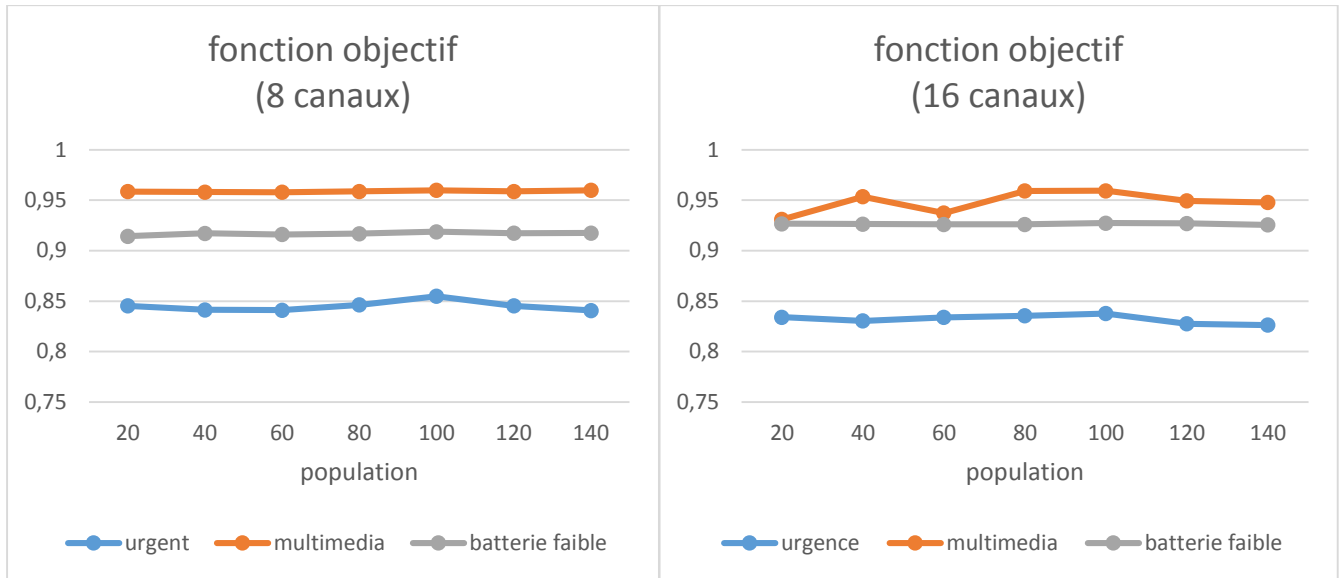


Figure IV.9 : résultat en termes d’optimalité

### IV.7.2 Algorithme B&B pour l’OFDM

Nous proposons un algorithme B&B qui assure une garantie de l’optimalité des solutions obtenues. Dans l’approche proposée.

Le principe du fonctionnement d’un algorithme B&B pour notre problème est défini comme suit :

On commence par initialiser un problème de départ avec un ensemble de solutions. Pour chaque solution, on calcule une borne inférieure et une borne supérieure et ainsi son interférence. Si cette borne supérieure est inférieure à la borne inférieure max qui est une variable global connue, ou la valeur de l’interférence de cette solution est supérieure a celle de l’interférence maximale, on ignore alors cet sous arbre engendré par cette solution et on passe à explorer une autre solution.

Dans le cas contraire, il existe deux possibilités : soit on est à une feuille et dans ce cas c’est une solution, on met à jour la borne inférieure si c’est nécessaire, soit on continue l’exploration de l’arbre de recherche.

On peut remarquer que cette méthode est fortement dépendante de l’efficacité du calcul de la borne inférieure.

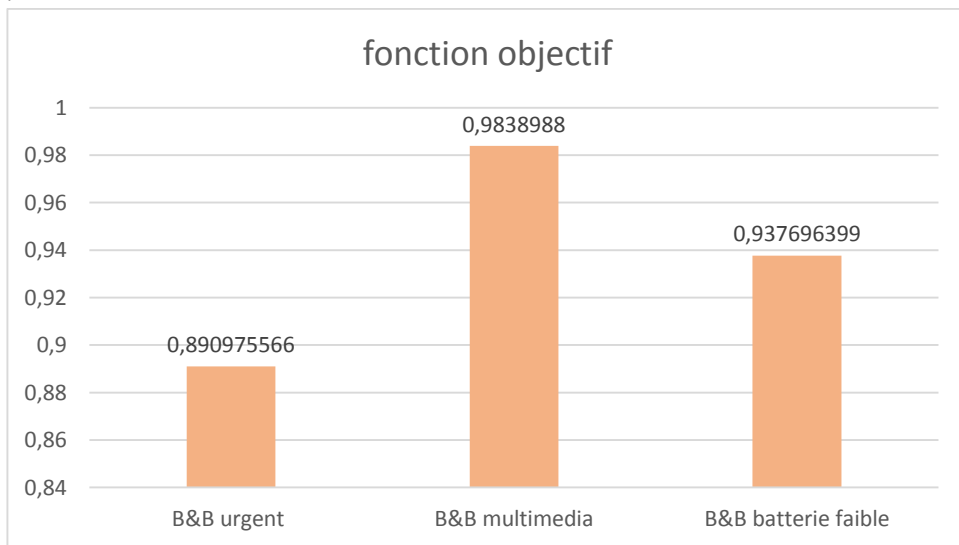
Le calcul des bornes (upper bound et lower bound) nous permet d’encadrer la valeur de la solution optimale. La plupart des bornes supérieures pour le problème se basent sur le tri des objets par ordre croissant d’efficacité.

La recherche continue jusqu’à ce que tous les nœuds sont soit explorés, soit éliminés.

```

Algorithm Branch and Bound
Sortie: solution optimal
Begin
Tree= {}
Bound=0
Node first = {occurrence=0, p=0, m=0, b=0, i=0}
Tree.add(first)
While (!Tree.isEmpty())
    occurrence++
    Choose node with high Upper Bound
    Generate the childrens of node
    Remove node from Tree
    Calculate upper bound
    Calculate interference
    If (Node.interference>interference_max)
        Remove Node
    End if
    If (Node.upper Bound<bound)
        Remove Node
    Else if (occurrence == n)
        Update best value of bound
    Else add children to Tree
    End if
End while
    
```

On a obtenu les résultats suivant après l’application de l’algorithme B&B avec un nombre de canaux =8.



**Figure VI.10 : résultat de fonction objectif (B&B)**

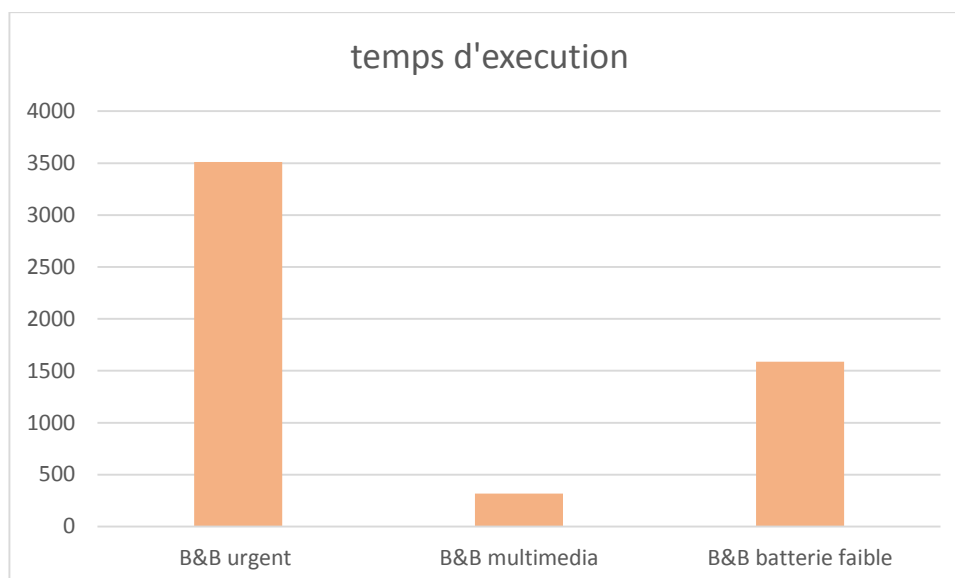


Figure VI.11 : résultat de temps exécution (B&B)

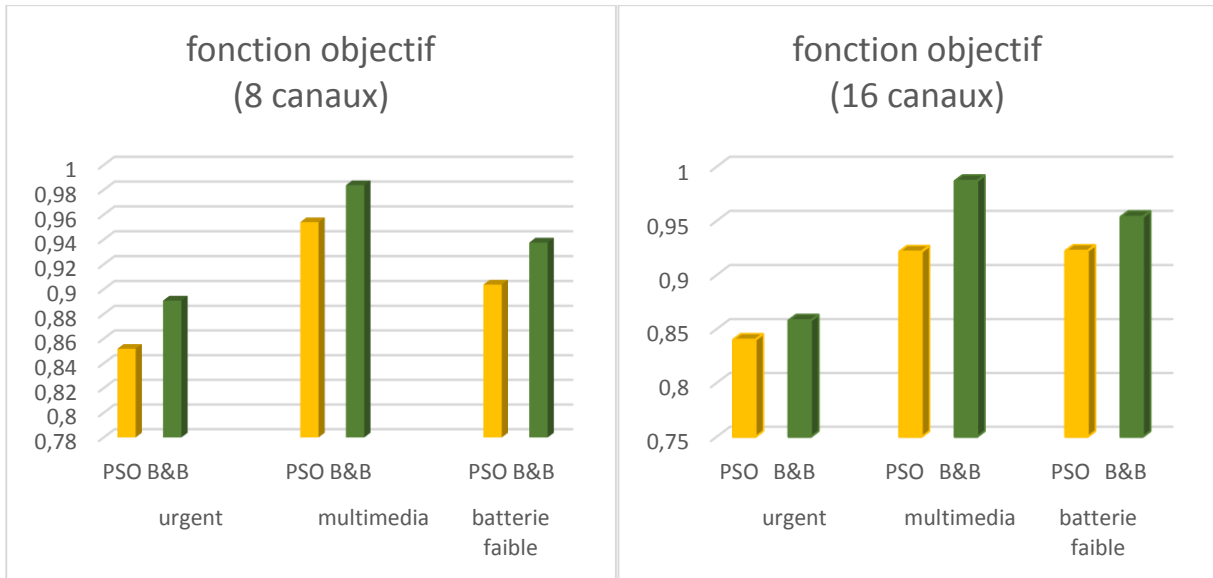
### IV.7.3 Comparaison des résultats obtenus

Pour comparer les résultats obtenus par la méta heuristique PSO et B&B dans les différents modes de transmission et en termes de temps et d’optimalité, ainsi pour chaque mode :

#### 1. En terme d’optimalité :

Nombre de canaux	algorithme	Mode urgent	Mode batterie faible	Mode multimédia
8 Canaux	PSO	0,8518	0,9038	0,9540
	B&B	0,8909	0,9376	0,9838
16 canaux	PSO	0,8401	0,9223	0,9216
	B&B	0,8580	0,9536	0,9868

Tableau IV .9 : résultat de fonction objectif du PSO par rapport au B&B



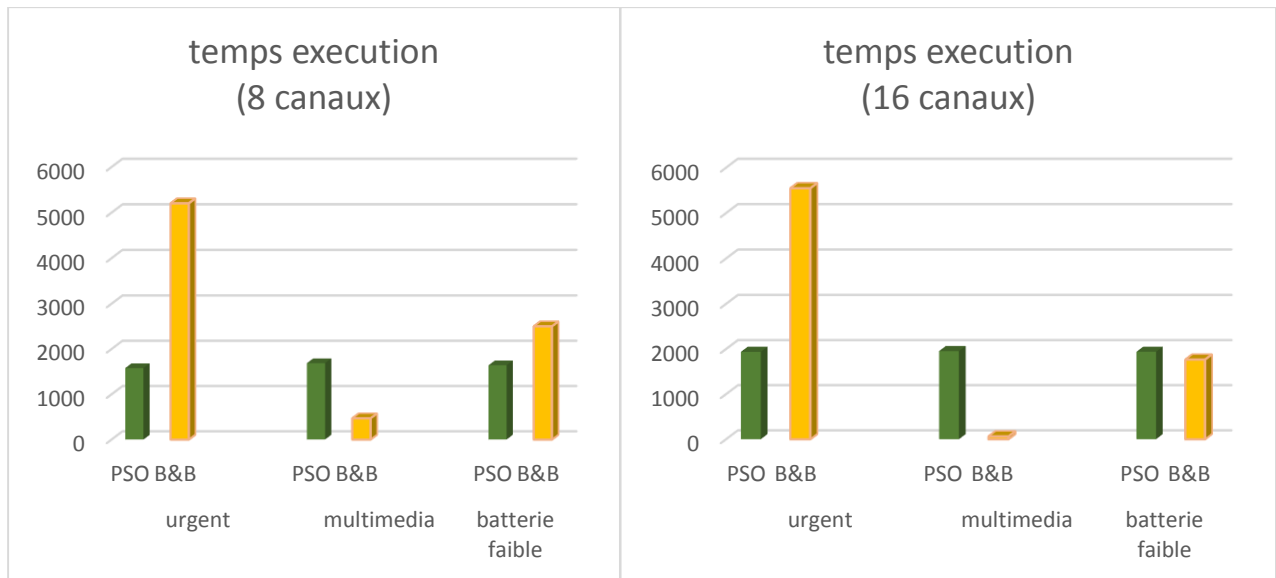
**Figure VI.12 : résultats de fonction objectif du PSO par rapport au B&B**

Ces résultats représentent la meilleure solution obtenue par la fonction objectif, pour le nombre de canaux en utilisant les valeurs 8 et 16. Les résultats obtenus et l'étude comparative réalisée entre les deux algorithmes proposés en termes de meilleurs solutions montrent que l'algorithme B&B est plus efficace que l'algorithme PSO.

**2. En terme de temps d'exécution :**

Nombre de canaux	algorithme	Mode urgent	Mode batterie faible	Mode multimédia
8 Canaux	PSO	1578ms	1640 ms	1687 ms
	B&B	5203 ms	2500 ms	468 ms
16 canaux	PSO	1937 ms	1938 ms	1953 ms
	B&B	5547 ms	1765 ms	63 ms

**Tableau VI.10 : résultats de temps d'exécution du PSO par rapport au B&B**



**Figure VI.13 : résultats de temps d'exécution du PSO par rapport au B&B**

Ces résultats représentent la moyenne de 10 simulations obtenues par le temps d'exécution, pour les canaux, utilisant les Valeurs 8 et 16. Les résultats obtenus et l'étude comparative réalisée entre les deux algorithmes proposés montrent que l'algorithme B&B plus efficace que l'algorithme PSO dans le mode multimédia par contre dans le mode urgence les résultats obtenu par PSO et plus rapide que B&B, alors que dans le mode batterie faible les résultats sont comparables.

## IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre contribution, ou, nous avons implémenté l'algorithme B&B pour l'optimisation de la QoS dans les réseaux radios cognitifs. En plus, nous avons aussi appliqué le PSO pour la comparaison des résultats.

Nous avons remarqué que B&B a réussi à trouver des meilleures solutions d'optimalité pour les trois modes par rapport au la méthode PSO. En outre nous avons aussi constaté en terme de temps d'exécution que PSO fournit des bons résultats en comparaison avec B&B dans le mode urgent par contre les résultats obtenu par B&B sont meilleurs que PSO dans le mode multimédia, et concernant les temps d'exécutions des algorithmes dans le mode batterie faible sont comparables.

# **Conclusion Générale**



La radio cognitive est un domaine technique aux frontières des télécommunications et de l'intelligence artificielle qui est conscient de son environnement. La RC est considérée comme une technologie émergente en matière d'accès sans fil, visant à améliorer considérablement l'utilisation du spectre radio en utilisant parfois la solution multi porteuses qui a la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) cette dernière montre que ce type de solution peut être adapté au contexte de la RC.

La différence principale entre les différentes techniques classiques de modulations multi porteuses et l'OFDM est que cette dernière autorise un fort recouvrement spectral entre les porteuses. Cela permet d'augmenter sensiblement le nombre de porteuses et d'améliorer l'efficacité spectrale.

Ainsi, le travail présenté dans ce mémoire vise à enrichir les techniques d'accès dynamique au spectre, afin de réaliser notre objectif, nous avons proposé une méthode exact B&B, en plus nous avons utilisé une méta-heuristique, intitulée PSO (Particle Swarm Optimization), pour montrer l'efficacité de la méthode B&B.

Nous avons utilisé des conditions spécifiques pour réduire les interférences pour obtenir des meilleurs résultats en termes de temps pour les deux algorithmes.

Les fonctions objectifs traitées dans ce travail, couvrent la maximisation du débit, minimisation du taux d'erreur et la minimisation de la consommation d'énergie, nous avons montré aussi une étude comparative entre les deux algorithmes PSO et B&B en prenant en considération le nombre de canaux et l'intervalle de puissance.

Nous avons constaté que l'algorithme B&B est meilleur que la méta-heuristique PSO en termes d'optimalité, et nous avons aussi remarqué en terme de temps d'exécution que PSO a des bons résultats que B&B dans le mode urgent par contre les résultats obtenus par B&B est meilleur que PSO dans le mode multimédia, et concernant les temps d'exécutions dans le mode batterie faible sont comparables.

Les résultats de simulation obtenus sont satisfaisants pour la résolution des problèmes d'optimisation, ils montrent que la PSO et B&B sont des algorithmes d'optimisation très performants.

Parmi les perspectives, il nous semble important de porter des améliorations sur notre algorithme de B&B, nous pensons au parallélisme de la méthode proposée en utilisant les threads.

Une autre direction de recherche qui nous semble intéressante est de réfléchir sur l'amélioration du B&B en appliquant la décision multicritère, en se basant sur les opérations algébriques de Pareto et topsis, ce qui donne des meilleurs résultats.

Nous pouvons aussi, comparer les performances de ces algorithmes avec d'autres alternatives de la classe méta-heuristiques, ou en faisant appel à d'autres techniques, telles que la théorie des jeux, les approches probabilistes....

## Bibliographie :

- [1] A. Amraoui, B. Benmammour, and Fethi Tarik Bendimerad. Utilisation des Enchères dans les Réseaux Radio Cognitifs pour l'Accès Dynamique au Spectre. "Première Conférence Nationale sur les Télécommunications' CNT'2012". (2012)
- [2] A. R. S. Bahai and B. R. Saltzberg, Multicarrier Digital Communication theory and application of OFDM. Kluwer Academic Publishers, New York & Boston, 2002.
- [3] A. SKRZYPCZAK<sup>1</sup>, J. PALICOT<sup>1</sup>, and P. SIOHAN<sup>2</sup>, "Utilisation de la modulation OFDM/OQAM pour l'insertion dynamique dans le spectre en "cognitive radio" ", Supélec/IETR, Equipe SCEE Avenue de la Boulaie, 35576 Cesson-Sévigné Cedex, France<sup>2</sup> Orange Labs 4 rue du Clos Courtel, BP 91226, 35512 Cesson-Sévigné Cedex, France .septembre 2009.
- [4] A. Skrzypczak, Contribution à l'étude des modulations multi-porteuses OFDM/OQAM et OFDM sur échantillonnées. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, Novembre 2007.
- [5] C. Barnhart, E. L. Johnson, G. L. Nemhauser, M. W. P. Savelsbergh, and P. H. Vance. « Branch-and-price: column generation for solving huge integer programs. Operations Research ». Vol. 46, N° 3, pp 316-329, 1998.
- [6] C. Lengoumbi, Accès multiple OFDMA pour les systèmes cellulaires post 3G : allocation de ressources et ordonnancement. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris, Mars 2008.
- [7] CLERC et SIARRY, « Une nouvelle méta-heuristique pour l'optimisation difficile : la méthode des essais particuliers » Vol. 3-7 France Télécom R&D; Université Paris (2004).
- [8] C.R. Nassar et al., Multicarrier technologies for Wireless communication. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [9] C. Xin, M. Song, L. Ma, C. Shen and G. Hsieh, "On random dynamic spectrum access for cognitive radio networks". pp 1–5. 2010.
- [10] Czyzak, P., & Jaszkiwicz, A. 1998. Pareto simulated annealing a metaheuristic technique for multiple-objective combinatorial optimisation. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis.
- [11] D. Guel, Etude de nouvelles techniques de réduction du « facteur de crête » à compatibilité descendante pour les systèmes multi-porteuses. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, Décembre 2009.
- [12] E. Gueguen, Etude et optimisation des techniques UWB haut débit multi-bandes OFDM. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Janvier 2009.
- [13] ETSI, "Digital Video Broadcasting (DVB); Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television," European Telecommunications Standards Institute, ETS EN 300 744 v 1.1.2, 1997.
- [14] ETSI EN 300 401, Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers, May 2001.
- [15] ETSI Normalization Committee. Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; Physical (PHY) Layer. Nonne ETSI, document RTS0023003-R2, European Telecommunications Standards Institute, Sophia-Antipolis, Valbonne, France, February 2001.
- [16] Federal Communications Commission (FCC). «Radio Technologies Proceeding» (CRTP), ET Docket, no. 03-108. Washington (2008).
- [17] Federal Communications Commission, First Report and Order in ET Docket No. 00-47, rapport, 2001.

- [18] F. Germain, J. Yang, S. Lasaulce, J. Mandon «Radio cognitive», Short Research Project, Ecole Polytechnique, France, (2008).
- [19] H. H. Chen, The next generation CDMA technologies. John Wiley & Sons, Ltd 2007.
- [20] H. Hijazi, Estimation de canal radio-mobile à évolution rapide dans les systèmes à modulation OFDM. Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, Novembre 2008.
- [21] Hirosaki, B, An Analysis of Automatic Equalizers for Orthogonally Multiplexed QAM Systems, IEEE Transactions on Communications, janvier 1980, volume 28, issue 1, pp 73-83.
- [22] H. Schulze and C. Lüders, Theory and Applications of OFDM and CDMA Wideband Wireless Communications. John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [23] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran and S. Mohanty, «Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey». Computer Networks, 50(13), 2127-2159 (2006).
- [24] I. Larabi et B. Benmammour « Négociation de spectre dans les réseaux de radio cognitive » Rapport de recherche, Laboratoire de Télécommunication de Tlemcen (LTT) Université Abou Bakr Bekaid. Tlemcen (2013)
- [25] I. Ngom et L. Diouf, "La radio cognitive", Université Lille 1 USTL, 2008.
- [26] J. Kennedy, R. Eberhart, and Y. Shi, «Swarm Intelligence», Morgan Kaufmann. (2001)
- [27] J. Mitola and G. Q. Maguire, «Cognitive radio: making software radios more personal, IEEE Personal Communications», Page(s) 13-18. (1999).
- [28] J. Mitola, «Cognitive Radio: an integrated agent architecture for software defined radio», PhD Thesis of the Royal Institute of Technology, (2000).
- [29] J. Mitola, «Cognitive radio architecture evolution». Proceedings of the IEEE, 97(4), 626-641. (2009).
- [30] J. M. PRATT, "A software defined radio for research into cognitive radio", Master thesis of science in electrical engineering, university of Missouri-rolla, 2007.
- [31] L. Hanzo et al., OFDM and MC-CDMA for broadband Multi-user communications, WLANs and broadcasting. John Wiley & Sons, Ltd, 2003
- [32] L. R. Ford, Jr., D. R. Fulkerson, (1958) A Suggested Computation for Maximal Multi-Commodity Network Flows. Management Science 5(1):97-101
- [33] M. Gafar, A. Elnourani. «Cognitive Radio and Game Theory: Overview And Simulation». Blekinge Institute of Technology. (2008).
- [34] M. Ihalainen, A. Viholainen, and M. Renfors, "On Spectrally Efficient Multiplexing in Cognitive Radio Systems," in ISWPC '08, Santorini, Greece, May 2008, pp. 675-679.
- [35] M. U. "Utilization of Cooperative Multiagent Systems for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks". PHD THESIS, UTT, Université de Technologie de Troyes. Sep 2011.
- [36] Mitola J., «Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio», Ph.D. Dissertation, KTH, 2000.
- [37] M. Padberg et G. Rinaldi. « A branch and cut algorithm for the resolution of large- scale symmetric traveling salesman problem ». SIAM Review. Vol. 33, N°1, pp. 60- 100, 1991.
- [38] N. A. Saoucha, "Paramétrage des algorithmes génétiques pour l'optimisation de la QoS dans les réseaux radios cognitifs", thèse de magistère, Université de M'sila, mars 2013.
- [39] N. Farhi, S. Helaimia . Etude et Simulation d'une Transmission de Type OFDM pour Les Communications Sans Fil. Mémoire master, UNIVERSITE LARBI TEBESSI - TEBESSA
- [40] N. LARBI , Détection multi-utilisateurs dans le contexte de communication mobile : Exploitation de la combinaison OFDM/CDMA. Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en science. UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE D'ORAN MOHAMED BOUDIAF
- [41] R. W. Chang, and R. A. Gibby, "Theoretical Study of Performance of an Orthogonal Multiplexing Data Transmission Scheme," IEEE Transactions on Communications, 16, 4, pp. 529-540, 1968.
- [42] SAOUCHA, N. Ali, BENMAMMAR, B, et al. on OFDM-based cognitive radio link adaptation using cross entropy approach. In: 2016 International Conference on Industrial Informatics and Computer Systems (CIICS). IEEE, 2016. p. 1-4.
- [43] S. B. Weinstein et P. M. Ebert, Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform, IEEE Transactions on Communication Technology, Vol. COM-19, No 5, pp. 628-634, Oct. 1971

## Bibliographie

---

---

- [44] S. Haykin, «Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. Selected Areas in Communications», IEEE Journal on, 23(2), 201-220. (2005).
- [45] T. Ridha. Développement d'un modèle OFDM pour la 4<sup>ème</sup> génération du mobile de communication. Mémoire magistère. UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF.
- [46] T. R. Newman, B. A. Barker, A. M. Wyglinski, A. Agah, J. B. Evans, and G. J. Minden, «Cognitive engine implementation for wireless multicarrier transceivers, Wireless Communications & Mobile Computing», vol. 7, no. 9, pp. 1129-1142, (November 2007).
- [47] Usama Mir. «Utilization of Cooperative Multi agent Systems for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks». PHD THESES, (September 2011).
- [48] Y.G. LI and S. Gordan, Orthogonal frequency division multiplexing for wireless communications. Springer science + business media, Inc 2006.
- [49] Yiping Xing, R. Chandramouli, Stefan Mangold et Sai Shankar N, « Dynamic Spectrum Access in Open Spectrum Wireless Networks», IEEE journal on selected areas in communications, VOL. 24, NO. 3, 2006.

**Figure I.1 : Evolution de la radio matérielle à la radio logicielle**

**Figure I.2 : Étapes développements dans la radio cognitive [44]**

**Figure I.3 : Relation entre radio cognitive et radio logicielle restreinte [29]**

**Figure I.4 : Architecteur de La Radio Cognitive**

**Figure I.5 : Cycle de Cognition [28]**

**Figure I.6 Accès au spectre Coopératif et non-coopératif [29]**

**Figure I.8 : Organigramme représentant les types d'enchères**

**Figure I.9 : Les Classes des méta-heuristiques**

**Figure II .1: Le scénario de coexistence des UP et US dans le système de communication multi porteur [42]**

**Figure II .2 (a) Spectre d'une sous-porteuse et (b) Spectre d'un signal OFDM [40]**

**Figure II .3: Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM [39]**

**Figure III .1 : Classification des méthodes d'optimisation.**

**Figure III .2 : Déplacement d'une particule.**

**Figure III. 3 : Organigramme standard de PSO**

**Figure III. 4 : Organigramme discret de PSO**

**Figure III .5 : l'algorithme de séparation et évaluation**

**Figure IV.1 : Les valeurs des bandes passantes de UP et US**

**Figure IV.2 : Structure d'une particule**

**Figure IV.3 : Exemple de codage réel**

**Figure IV.4 : Interface d'accueil**

**Figure IV.5 : fenêtre principale.**

**Figure IV.6 : panel simulation.**

**Figure IV.7 : Histogrammes des caractéristiques de canaux**

**Figure IV.8 : Liste des individus**

**Figure IV.9 : résultat en termes d'optimalité**

**Figure VI.10 : résultat de fonction objectif (B&B)**

**Figure VI.11 : résultat de temps exécution (B&B)**

**Figure VI.12 : résultats de fonction objectif du PSO par rapport au B&B**

**Figure VI.13 : résultats de temps d'exécution du PSO par rapport au B&B**

## Liste des tableaux :

---

---

**Tableau IV .1 : Représentation mathématique des trois critères [7]**

**Tableau IV.2 : Taux d'erreur sur les différents types de modulation [46]**

**Tableau IV .3 : Définition des différents paramètres**

**Tableau IV .4 : Influence des différents paramètres**

**Tableau IV.5 : Poids associé aux différents modes de transmission**

**Tableau IV.6 : codage réel de la puissance**

**Tableau IV.7 : Codage réel de la modulation**

**Tableau IV.8 : Codage réel de nombre de bits**

**Tableau IV .9: résultat de temps de fonction objectif du PSO par rapport au B&B**

**Tableau VI.10 : résultats de temps d'exécution du PSO par rapport au B&B**

## Liste des abréviations:

<b>Acronyme</b>	<b>Signification</b>
BRAN	<b>B</b> roadband <b>R</b> adio <b>A</b> ccess <b>N</b> etwork
BS	<b>B</b> ase <b>S</b> tation
B&B	<b>B</b> ranch and <b>B</b> ound
CP	<b>C</b> yclic <b>P</b> refix
DAB	<b>D</b> igital <b>A</b> udio <b>B</b> roadcasting
DVB-T	<b>D</b> igital <b>V</b> ideo <b>B</b> roadcasting <b>t</b> errestrial
FCC	<b>F</b> ederal <b>C</b> ommunications <b>C</b> ommission
FDM	<b>F</b> requency <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplex
IA	<b>I</b> ntelligence <b>A</b> rtificielle
ICI	<b>I</b> nter <b>C</b> arrier <b>I</b> nterférence
ISI	<b>I</b> nter- <b>S</b> ymbol <b>I</b> nterférence
OFDM	<b>O</b> rthogonal <b>F</b> requency <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplex
POC	<b>P</b> roblème d' <b>O</b> ptimisation <b>C</b> ombinatoire
PSK	<b>P</b> hase <b>S</b> hift <b>K</b> eying
PSO	<b>P</b> articule <b>S</b> warm <b>O</b> ptimsation
QAM	<b>Q</b> uadrature <b>A</b> mplitude <b>M</b> odulation
QOS	<b>Q</b> uality <b>O</b> f <b>S</b> ervice
RC	<b>R</b> adio <b>C</b> ognitive
RF	<b>R</b> adio <b>F</b> reqency
RRC	<b>R</b> éseaux de <b>R</b> adio <b>C</b> ognitive
SDR	<b>S</b> oftware <b>D</b> efined <b>R</b> adio
SMA	<b>S</b> ystème <b>M</b> ulti <b>A</b> gents
SP	<b>S</b> ensory <b>P</b> erception
TFDI	<b>T</b> ransformée de <b>F</b> ourier <b>D</b> iscrete <b>I</b> nverse
UP	<b>P</b> rimary <b>U</b> ser
URC	<b>U</b> tilisateur à <b>R</b> adio <b>C</b> ognitive
US	<b>S</b> econdary <b>U</b> ser
U-NII	<b>U</b> nlicensed <b>N</b> ational <b>I</b> nformation <b>I</b> nfastructure