

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Université Abou Bakr 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*

**Optimisation de la QoS dans un réseau de radio  
cognitive en utilisant l'algorithme de la recherche  
par harmonie**

**Réalisé par :**

- Melle Ferhat Halima

*Présenté le 21 Juin 2015 devant le jury composé de MM.*

- LEHSAINI Mohamed. (Président)
- BENMAMMAR Badr (Encadrant)
- Melle ALI SAOUCHE Naziha (cdta) (Co-Encadrante)
- BENZIANE Yaghmoracen (Examineur)
- MANA Mohamed (Examineur)

**Année Universitaire : 2014-2015**

# *Remerciements*

Je remercie dieu tout puissant, qui m'a donné la force et la patience pour l'accomplissement de ce travail

Je tiens à remercier Monsieur Benmammar Badr de m'avoir proposé un tel sujet, et pour ses précieux conseils et remarques qu'il m'a donné lors de la réalisation de ce travail.

Je remercie le Professeur LEHSAINI Mohamed, tout d'abord d'être mon professeur pendant trois ans d'études, j'ai pris beaucoup de choses de ces cours et aujourd'hui pour avoir accepté de présider mon jury.

Je remercie également les membres du jury: Y. *BENZIANE*, M. *MANA* d'avoir accepté l'examination et l'évaluation de ce travail et pour le temps qu'ils ont consacré pour la lecture du mémoire.

Je tiens aussi à remercier mes parents adoptifs que je ne cesserai jamais d'exprimer ma reconnaissance, mon respect et mon amour pour eux pour la qualité de leur éducation, pour leur confiance et leur soutien sans faille. Je considère qu'ils ont et qu'ils auront toujours une part importante dans mes réussites professionnelles et personnelles grâce à leurs soutiens affectifs et matériels qu'ils m'ont apporté tout au long de mon existence.

Mes remerciements les plus vifs à tous membres de ma petite famille.

Enfin Je voudrais remercier chaleureusement ceux qui ont, de près ou de loin, aidé à rendre ce travail possible, que ce soit par des idées ou par des encouragements.

# *Dédicace*

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents....je vous aime énormément.

*Mes frères : Abdelhakim et son épouse Hafida et ses enfants, Abdelsamad et son épouse Houaria et leurs petit Mehdi, à Boumediene et Mohammed.*

*Ma sœur Asia, son mari Mohamed et ses enfants : Alaa, Yacine, Adel, Hoda et Riham qui m'ont apporté un soutien inconditionnel lors des moments difficiles.*

*Ma camarade Hanane qui m'a accompagné tout au long de réalisation de ce mémoire.*

---

# Résumé

---

La Radio Cognitive a été apparue comme étant une solution prometteuse qui tente à régler les inconvénients du problème de l'encombrement et l'insuffisance spectrale tout en partageant le spectre entre un utilisateur opportuniste dit secondaire et un utilisateur propriétaire appelé primaire. Dans notre mémoire, nous nous sommes intéressés à l'optimisation de la qualité de service dans le domaine de la radio cognitive, et dans un contexte multicanaux en utilisant une méta-heuristique appelée « recherche par harmonie ». Les résultats ont montré que l'utilisation de cet algorithme peut améliorer significativement la qualité de service de l'utilisateur, mais il doit être limité à un certain nombre de sous porteuses pour être utilisé dans un contexte temps réel.

**MOT CLES :** Radio cognitive, optimisation mono-objective, recherche par harmonie, QoS.

## Abstract

---

Cognitive radio has been emerged as a promising solution, trying to solve the disadvantages of congestion and spectral failure, it is based on the sharing of the spectrum between an opportunistic user called secondary and an owner user named primary. In the context of our project, we are interested in optimizing the quality of service in cognitive radio networks, and a multi-channel environment using a metaheuristic called "Harmony Search". The results showed that the use of this algorithm can significantly improve the quality of service of the user, but its use should be limited to a number of subcarriers (channels) in order to be used in a real time context.

**KEYWORDS:** Cognitive radio, mono-objective optimization, Harmony Search, QoS.

## ملخص

---

ظهرت الأنظمة الراديوية الإدراكية كحل واعدة، تحاول حل مساوئ مشكلة الازدحام و الندرة التي يواجهها الطيف الراديوي، حيث يركز مبدأ هاته الأنظمة على تقاسم الطيف الراديوي بين المستخدم الأولي و المستخدم الثانوي. في سياق هذه المذكرة نحن مهتمون بتحسين جودة الخدمة في الشبكات الراديوية الإدراكية في اطار متعدد القنوات باستخدام خوارزمية " البحث عن قطعة موسيقية مثلى" و قد أظهرت النتائج أن استخدام هذه الخوارزمية يمكن أن يحسن بشكل ملحوظ نوعية و جودة الخدمة للمستخدم، ولكن استخدامه ينبغي أن يقتصر على عدد من الحوامل الجزئية (قنوات) لاستخدامها في سياق الوقت الحقيقي

**الكلمات المفتاحية :** الراديو الإدراكية، التحسين الواحد الهدف، البحث عن قطعة موسيقية مثلى، جودة الخدمة

# Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>4</b>
<b>CHAPITRE 1 : RESEAUX DE RADIO COGNITIVE .....</b>	<b>7</b>
<b>I. INTRODUCTION .....</b>	<b>7</b>
<b>II. LA GESTION DU SPECTRE .....</b>	<b>8</b>
<b>III. LA RADIO LOGICIELLE.....</b>	<b>9</b>
III.1 HISTORIQUE.....	9
III.2 DEFINITION .....	9
<b>IV. LA RADIO COGNITIVE.....</b>	<b>11</b>
IV.1 HISTORIQUE .....	11
IV.2 DEFINITION .....	12
IV.3 ARCHITECTURE DE LA RC .....	13
IV.4 FONCTIONS DE LA RC .....	14
1. Détection du spectre (Spectrum Sensing).....	14
2. Gestion du spectre (Spectrum management) .....	15
3. Mobilité du spectre (Spectrum Mobility) .....	16
IV.5 DOMAINES D'APPLICATION DE LA RADIO COGNITIVE .....	16
1. Les réseaux sans fil de la prochaine génération.....	16
2. Coexistence de différentes technologies sans fil .....	16
3. Réseaux d'urgence .....	17
4. Services de cyber santé (E-Health services).....	17
<b>V. CONCLUSION.....</b>	<b>17</b>
<b>CHAPITRE 2 : ALGORITHME DE LA RECHERCHE PAR HARMONIE .....</b>	<b>19</b>
<b>I. INTRODUCTION .....</b>	<b>19</b>
<b>II. NOTIONS FONDAMENTALES SUR LES METAHEURISTIQUES .....</b>	<b>20</b>
II.1 TERMINOLOGIES .....	20
II.2 PRESENTATION DES HEURISTIQUES .....	20
II.3 PRESENTATION DES METAHEURISTIQUES .....	21
II.4 CLASSIFICATION .....	22
1. Leur manière d'utiliser la fonction objective .....	22
2. Le nombre de solutions .....	22
3. Suivant la source d'inspiration .....	24
II.5 LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE METAHEURISTIQUES .....	25
1. La diversification.....	25
2. L'intensification .....	25
<b>III. LA RECHERCHE PAR HARMONIE.....</b>	<b>26</b>
III.1 INTRODUCTION.....	26
III.2 L'ALGORITHME DE LA RECHERCHE PAR HARMONIE (HARMONY SEARCH) .....	26
III.3 ANALOGIE ENTRE LA MUSIQUE D'IMPROVISATION ET L'OPTIMISATION .....	30
III.4 LES AVANTAGES DE LA RECHERCHE PAR HARMONIE.....	31
<b>IV. CONCLUSION.....</b>	<b>32</b>

<b>CHAPITRE 3 : IMPLEMENTATION DE L'APPLICATION ET EVALUATION DES RESULTATS.....</b>	<b>34</b>
<b>I. INTRODUCTION.....</b>	<b>34</b>
<b>II. LA FONCTION OBJECTIVE.....</b>	<b>34</b>
<b>III. DEFINITION DES PARAMETRES .....</b>	<b>35</b>
<b>IV. LES MODES DE TRANSMISSION .....</b>	<b>37</b>
1. MODE URGENCE.....	37
2. MODE BATTERIE FAIBLE.....	38
3. MODE MULTIMEDIA .....	38
<b>V. LES PARAMETRES UTILISES.....</b>	<b>39</b>
1. LA PUISSANCE .....	39
2. LA MODULATION .....	39
3. LE TAUX DE BRUIT.....	40
<b>VI. LE CODAGE.....</b>	<b>40</b>
<b>VII. APPLICATION DE L'ALGORITHME.....</b>	<b>40</b>
1. INITIALISATION DE LA POPULATION.....	40
2. GENERATION DE NOUVELLES SOLUTIONS .....	41
3. MODIFICATION DE LA POPULATION .....	43
4. VERIFICATION DU CRITERE D'ARRET .....	43
<b>VIII. PRESENTATION DE L'APPLICATION.....</b>	<b>43</b>
<b>IX. COMPORTEMENT DE L'ALGORITHME DANS LES DIFFERENTS MODES.....</b>	<b>48</b>
1. FONCTION OBJECTIF.....	48
2. TEMPS DE CALCUL.....	50
<b>X. RECHERCHE HARMONIE VS ALGORITHME GENETIQUE EN TERME DE FONCTION OBJECTIVE.....</b>	<b>50</b>
<b>XI. CONCLUSION.....</b>	<b>51</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>52</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>57</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>58</b>
<b>GLOSSAIRE.....</b>	<b>59</b>

# *Introduction Générale*

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Nous vivons une époque où l'évolution de la technologie est en vigoureuse croissance, nous passons d'une génération à une autre. Du mobile cellulaire de la première génération à la téléphonie de multimédia de la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> génération, ce passage profite des débits plus élevés et de services de plus en plus évolués. Cette évolution de technologies sans fils produit une forte demande en termes de spectre électromagnétique qui présente en fait le support de transmission, ce qui entraîne de subir un blocage et qui intensifie les probabilités d'encombrement, d'interférences et de saturation de celui-ci.

En outre, plusieurs études faites tel que l'étude mentionnée par la Federal Communications Commission (FCC) qui présente un organisme de régulation et de gestion du spectre aux États-Unis a exposé que le spectre est utilisé d'une façon non optimale, dont certaines bandes deviennent alourdis tandis que d'autres bandes sont intensivement sous exploitées. On parcourant le spectre entièrement, il est fort possible à un endroit et un moment donnée de trouver certaines bandes non exploitées par son propriétaire ce qui affecte une perte au niveau de ressources spectrales, donc il serait prudent d'accéder à cette bande non utilisée. Pour pallier ce problème les ingénieurs ont proposé une nouvelle politique d'accès au spectre plus adaptée, plus flexible à ce genre de cas, qui est la radio cognitive (RC) dont le but est non seulement de mieux exploiter le spectre mais encore plus d'assurer une meilleure qualité de service (QoS) aux utilisateurs. Cette technologie permet aussi de mieux répartir les ressources disponibles et donc d'augmenter le nombre d'utilisateurs.

En réalité, le concept de la radio cognitive est en interaction entre l'intelligence artificielle et la technologie sans fil, elle permet à un terminal cognitif de détecter les fréquences occupées et les fréquences non exploitées, de les utilisées et de s'y adapter.

Cependant, la mise en œuvre de cette technologie requière des études fouillées sur la détection des ressources libres, la gestion de la mobilité spectrale, le partage du spectre etc. Parmi les études effectuées dans ce domaine on peut citer l'étude de Newman [28], on peut remarquer que les auteurs de cette étude ont opté pour un paramétrage standard des algorithmes génétiques (AGs) ou le nombre de génération a été fixé, le type de codage utilisé est toujours le même et le nombre de sous porteuse disponible est de l'ordre de 64 [29].

# Introduction générale

---

Dans ce contexte nous traitons une problématique majeure : l'optimisation de la qualité de service dans un réseau de radio cognitive.

Notre contribution consiste à répondre à la problématique mentionnée ci-dessus, donc nous proposons dans ce mémoire de Master une solution qui se base sur une métaheuristique qui s'appelle « La recherche par harmonie » afin de trouver une meilleure solution pour optimiser la qualité de service dans les réseaux de radio cognitive tout en variant le nombre d'individus et le nombre de canaux par un individu, ainsi que le nombre de générations.

Ce manuscrit est organisé comme suit :

**Pendant le premier chapitre**, nous introduisons les problèmes provoqués par la gestion courante du spectre, ensuite nous aborderons une présentation détaillée de la RC dans ses différentes caractéristiques et fonctionnalités, son architecture, sa frontière avec la radio logicielle, ainsi que ses domaines d'applications.

**Dans le deuxième chapitre**, nous nous focalisons sur la notion des heuristiques et métaheuristiques ainsi que leurs caractéristiques et leurs classifications. Ensuite, nous présentons la métaheuristique « recherche par harmonie » utilisée au sein de notre projet.

**Au sein du troisième chapitre**, nous développerons en premier lieu l'approche utilisée pour résoudre le problème de la qualité de service dans les réseaux de radio cognitive en utilisant la recherche par harmonie, en deuxième lieu nous présentons les paramètres de simulation, les métriques examinées et les résultats obtenues.

Une conclusion générale est présentée à la fin du mémoire pour enserrer notre travail et pour en donner des visions sur les futures perspectives dans le domaine de la radio cognitive.

*Chapitre I*  
*Réseaux de radio cognitive*

## Chapitre 1 : Réseaux de radio cognitive

### I. Introduction

C'était le 12 janvier 2010, exactement dans la capitale « Port-au-Prince » de Haïti où un tremblement de terre a ébranlé la terre sous les haïtiens, fait près de 300 000 victimes, aboutit ainsi à des défauts de fonctionnement au niveau des tours de communication sans fil et par conséquent les secours ont fait face à des obstacles pour échanger des informations vitales, et pour sauver les vies des haïtiens.

Dans un pareil scénario, l'infrastructure de communication standard peut ne pas être disponible, et par conséquent un système de communication sans fil adaptatif peut être essentiel d'être créé pour fixer la reprise après sinistre [7]. Or des recherches récentes sont menées à des solutions comptant sur des nouvelles technologies tel que la radio cognitive, l'une des technologies clé de la future cinquième génération, et qui pourrait faire une révolution au monde des réseaux sans fil, elle a été née comme une solution encourageante apportant avec elle une gestion dynamique du spectre dont l'objectif principale est de résoudre le problème de l'insuffisance du spectre, et aussi, garantir une meilleure QoS aux utilisateurs selon leurs nécessités.

Les terminaux cognitifs tel que les mobiles sans fil peuvent communiquer entre eux grâce à l'intelligence artificielle, et de s'adapter plus facilement aux cas d'urgences, et par conséquent ils peuvent percevoir l'état de l'utilisateur et réagir en conséquence, l'exemple ou un utilisateur est le victime d'une crise cardiaque, son terminal alerte le centre le plus proche de soin, en effet il peut détecter la fréquence cardiaque de l'utilisateur grâce à un réseau PAN [13].

En 2003, l'étude [3] faite par la SPTF (Spectrum Policy Task Force) de la Federal Communication Commission (FCC) a montré que certaines bandes de fréquences sont fortement utilisées par les systèmes licenciés pendant des durées et zones géographiques particuliers tandis qu'un bon nombre de bandes restent inutilisables et inoccupée, par exemple dans la période d'après minuit, et qui provoque une saturation exagérée de la table d'allocation du spectre. Cette découverte a motivé les ingénieurs de la FCC à améliorer l'accès aux bandes de sorte à optimiser les performances du système à travers une meilleure utilisation du temps, de la fréquence, de la puissance, de la bande passante et de l'espace. Pendant ce chapitre, nous tenterons de vous présenter en premier lieu les problèmes liés à la gestion du spectre conduisant à

un état de blocage, en second lieu nous présenterons les grandes lignes de cette nouvelle technologie, leur historique, ses différentes fonctions, leur architecture, et ses multiples domaines d'application.

## II. La gestion du spectre

Le spectre est une ressource rare, précieuse géré par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) depuis 1927, cet institut présente un ensemble de nations unies qui collaborent entre eux afin de mieux gérer le spectre radio sur une base nationale et internationale, ces nations réunissent et ordonnent chaque trois ans des conférences appelées CMR (conférences mondiales des radiocommunications) pour délibérer et, si nécessaire réviser les traités internationaux qui réglementent l'usage du spectre [18].

En effet, l'UIT alloue des plages de fréquences entre 3 Kilohertz et 300 gigahertz à une suite d'utilisations distinguées comme il est montré dans la **Figure 1.1**. Le processus d'allocation du spectre passe par la suite à une autorité compétente de gestion du spectre (AGS) au niveau de chaque pays, telle que la CRTC (Canadian Radiotélévision and Telecommunications Commission) au Canada, la FCC (Federal Communications Commission) aux États-Unis, ARCEP (Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes) en France, cette autorité gère quotidiennement l'utilisation du spectre suivant à l'UIT, ainsi, elle élabore des plans plus significatifs pour ces utilisations dans des différents genres d'activités économiques, industrielle, privées, commerciales etc. Ensuite l'affectation du processus de gestion du spectre se fait au niveau local afin d'attribuer des licences<sup>1</sup> aux utilisateurs finaux.

---

<sup>1</sup> Licence : droit exclusif d'opérer sur une fréquence X à un endroit spécifique.

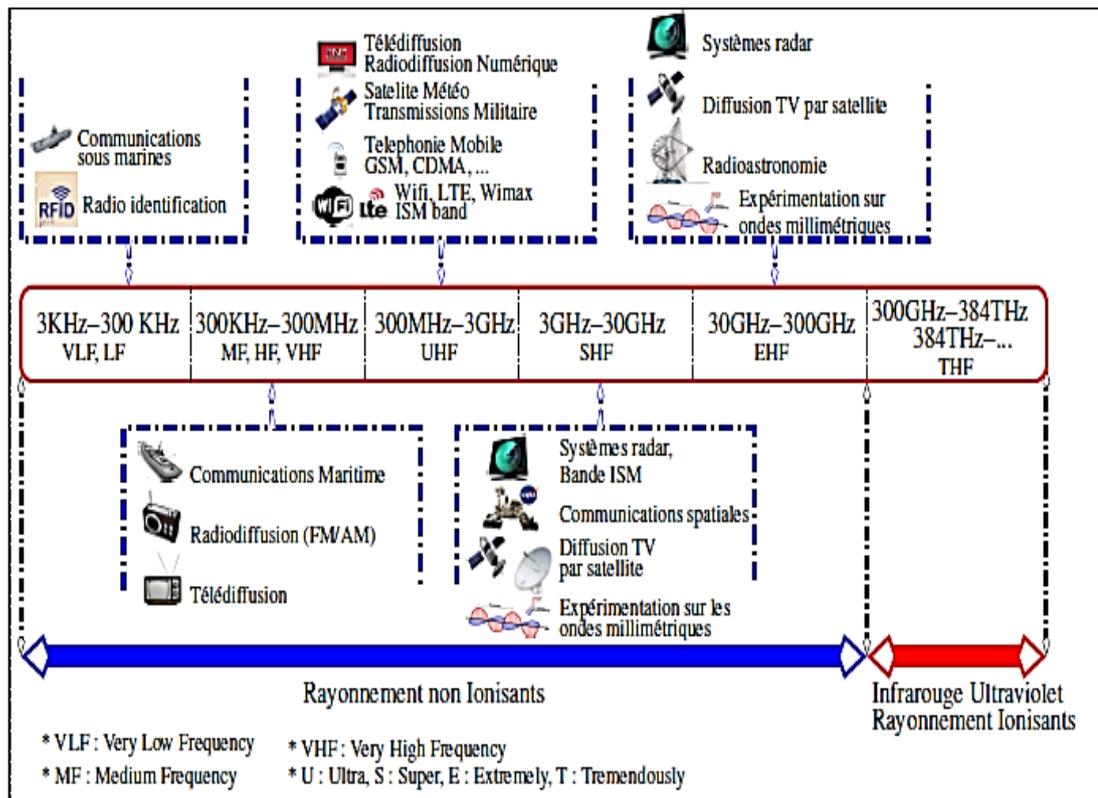


Figure I.1 : Répartition du spectre radio fréquence en fonction des technologies [8]

### III. La radio logicielle

Dans cette section nous allons étudier la radio logicielle qui présente le point de départ de la radio cognitive, ensuite nous allons présenter la radio cognitive (RC) dans ses différentes apparences : principe, fonctionnement et domaines d'applications.

#### III.1 Historique

L'idée de la radio cognitive se développe autour du concept de « la radio logicielle », l'histoire de la radio logicielle reviendra aux travaux de Jozef Milota en 1991 pour définir une classe de radio reconfigurable utilisant des techniques de traitement numérique du signal sur des circuits numérique programmables [12].

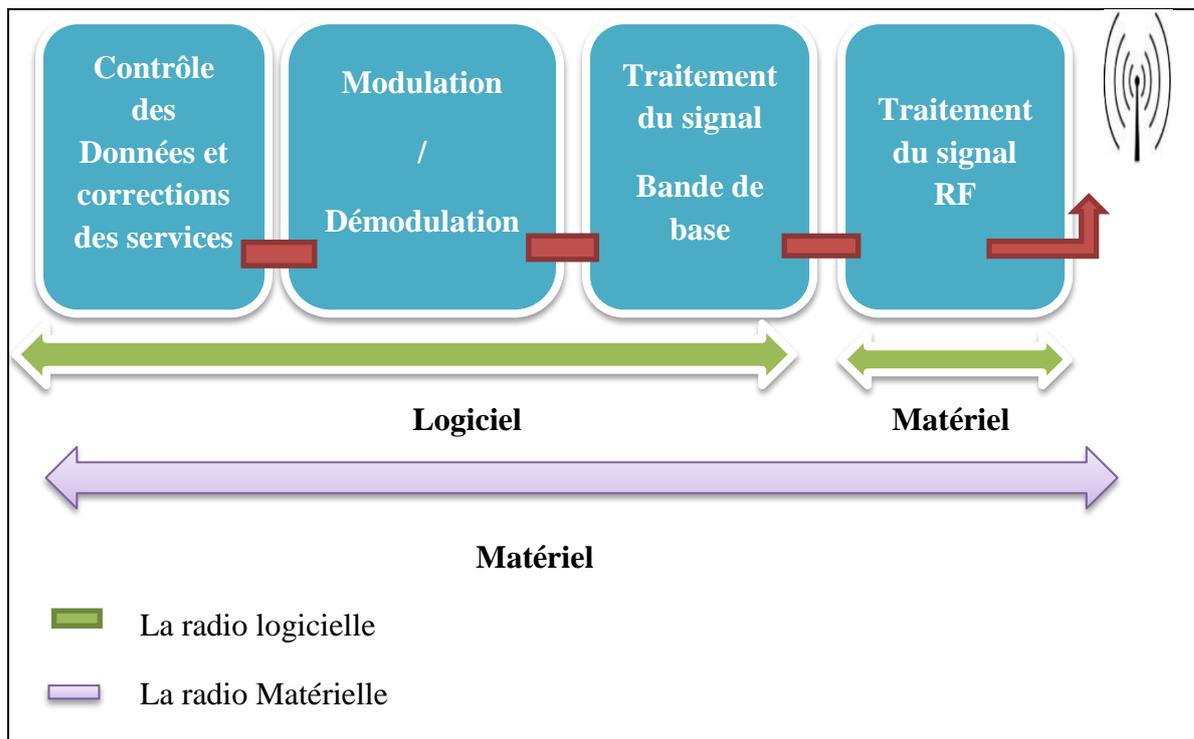
#### III.2 Définition

La radio logicielle est un système de radiocommunication qui permet à des équipements de communiquer avec n'importe quel standard de radiocommunications par la seule modification du logiciel et sans aucune modification matériel [21].

Les radios logicielles modernes dites aussi intelligentes mettent également en œuvre l’implantation logicielle des procédés de cryptographie, codage correcteur d’erreur, codage source de la voix, de la vidéo ou des données [21].

Nous différencions dans ce domaine plusieurs niveaux de progrès, on parle donc de la radio logicielle restreinte (software defined radio SDR) qui présente aujourd’hui un des sujets chauds parmi les multiples activités radioamateur. La SDR est un système de radiocommunication qui résout les problèmes de la gestion dynamique du spectre et qui apporte aussi le principe de flexibilité ; de tel sorte que les équipements SDR peuvent s’adapter automatiquement aux nouvelles fréquences afin de transmettre et recevoir des signaux, et peuvent aussi modifier le type de modulation et le niveau de puissance en utilisant le même matériel et sans nécessiter d’utiliser un nouveau matériel [12].

L’évolution de la radio matérielle à la radio logicielle est montrée dans la **Figure I.2**



**Figure I.2** : L’évolution de la radio matérielle à la radio logicielle [17]

## IV. La radio cognitive

### IV.1 Historique

Le nom du Dr Joseph Mitola III est pratiquement le synonyme de la radio cognitive, connu comme « le père de la RC », Il a proposé son idée sur la radio cognitive lors d'un séminaire à l'institut royal de technologie (KTH, Stockholm, Suède) en 1998. Le concept a été soutenu au départ par la Défense américaine, publié plus tard en 1999 dans un article de Mitola et KTH professeur de communications Gerald Q. Maguire, et en 2000 il l'a publié dans sa Thèse de doctorat.

D'après « Mitola » [14], une radio cognitive peut connaître, percevoir et apprendre de son environnement puis agir pour simplifier la vie de l'utilisateur

Dans le même sens, Haykin [24] définit la RC comme :

« Cognitive radio is an intelligent wireless communication system that is aware of its surrounding environment (i.e., outside world), and uses the methodology of understanding-by-building to learn from the environment and adapt its internal states to statistical variations in the incoming radio frequency stimuli by making corresponding changes in certain operating parameters (e.g., transmit power i carrier-frequency, and modulation strategy) in real-time, with two primary objectives in mind :(i.) highly reliable communication whenever and wherever needed and (ii.) efficient utilization of the radio spectrum »<sup>2</sup>

En 2003, la FCC [27] a introduit une définition beaucoup plus enserrée de la RC comme une radio qui peut interagir avec son environnement radio afin de s'y adapter, d'y détecter les fréquences non utilisées et de les exploiter. La **Figure I.3** définit les étapes chronologiques de développement du RC :

---

<sup>2</sup> Nous avons pris la décision de ne pas traduire cette définition pour qu'elle garde toute son intégrité et tout son sens.

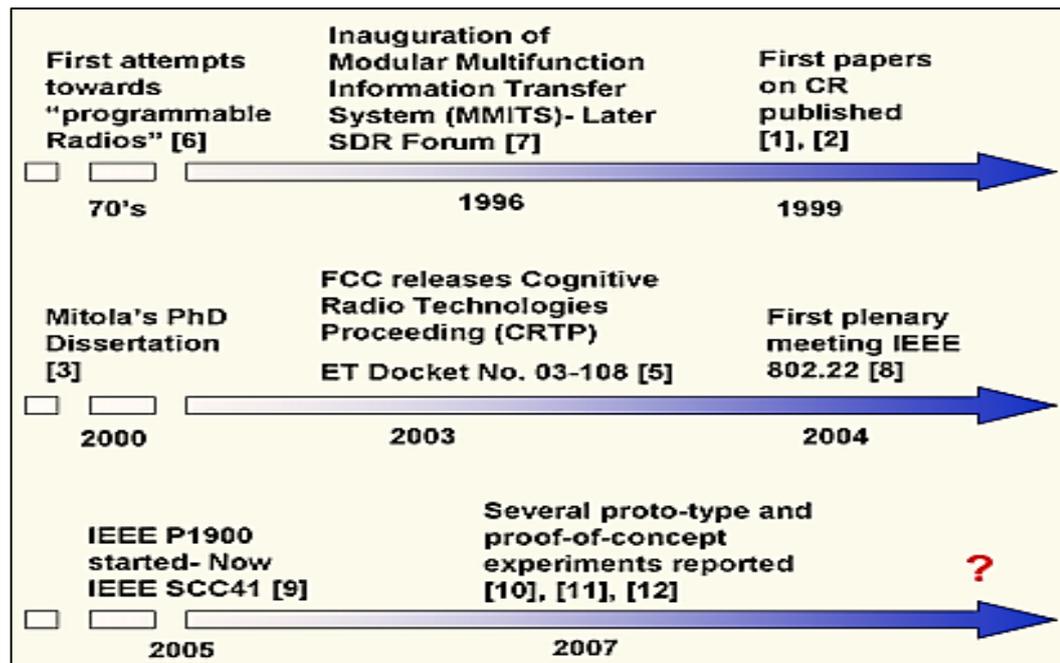


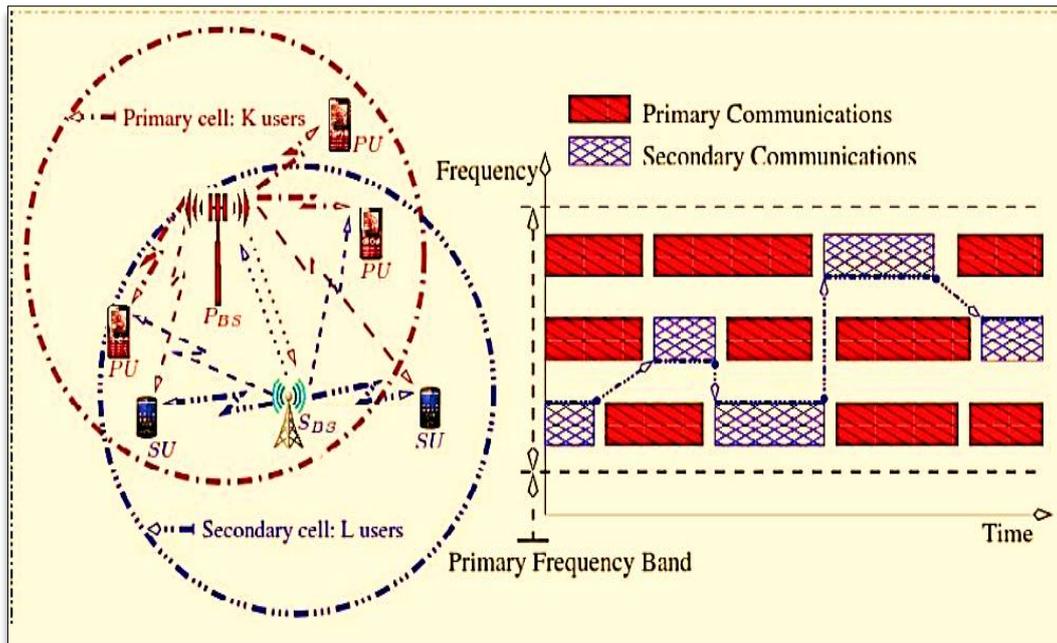
Figure I.3: Etapes de développement de la radio cognitive [17]

## IV.2 Définition

La radio cognitive est une nouvelle apparence, nouvelle technologie dont les émetteurs/récepteurs sont capables de détecter intelligemment les espaces utilisée/inutilisées dans le spectre, aussi, de surveiller les transmissions des utilisateurs primaires PU (Primary User) et d'exploiter en temps-réel les informations disponibles dans son environnement et de les changer tel que les puissances d'émission, modulations, les protocoles, si c'est nécessaire pour qu'une communication soit réussite, elle définit alors le concept de flexibilité des transmissions radio.

La radio cognitive essaye de régler les inconvénients qui se destinent au problème d'encombrement et d'insuffisance spectrale ou il y a des espaces blancs non occupés par ses propriétaires comme il est illustré dans la **Figure I.4**. On parle donc d'utilisateurs primaires qui disposent d'une licence et des droits de communications en toute autonomie et a tous instant sur leurs bandes spectrales, tandis qu'un utilisateur secondaire dit aussi un utilisateur cognitif SU (Secondary User), tout un utilisateur qui accède d'une façon opportuniste au spectre (possède pas de licences pour transmettre), donc il profite bien de l'absence des PU. Le SU devra céder une fois le service est achevé et devra surveiller à ne pas gêner les utilisateurs primaires.

L'objectif globale de la radio cognitive est donc d'ouvrir les bandes licenciées au niveau du spectre à ces SU (Secondary User) sans brouiller les communications des PU qui sont seuls admis de l'utiliser.



**Figure I.4:** Exemple d'exploitation des bandes libres par le SU [8]

### IV.3 Architecture de la RC

L'architecture d'une radio cognitive introduite par J. Mitola définit par un ensemble typique de six composantes qui réalise une série de fonctions et de service comme nous voyons dans la **Figure I.5**:

- La perception sensorielle de l'utilisateur qui inclut l'interface haptique (du toucher) acoustique, la vidéo et les fonctions de détection et de la perception.
- Les capteurs de l'environnement local (emplacement, température, accéléromètre, etc.)
- 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, de l'apprentissage).
- Les fonctions locales effectrices (synthèse de la parole, du texte, des graphiques et des affiches multimédias).

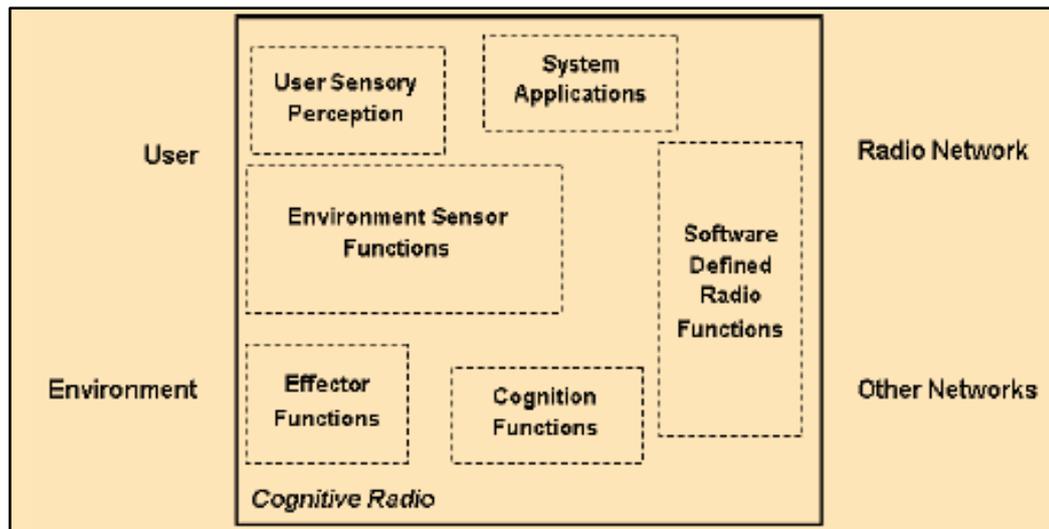


Figure I.5 : Architecture de la radio cognitive [12]

#### IV.4 Fonctions de la RC

Les fonctions principales de la radio cognitive sont définies comme nous les voyons dans la Figure I.6 :

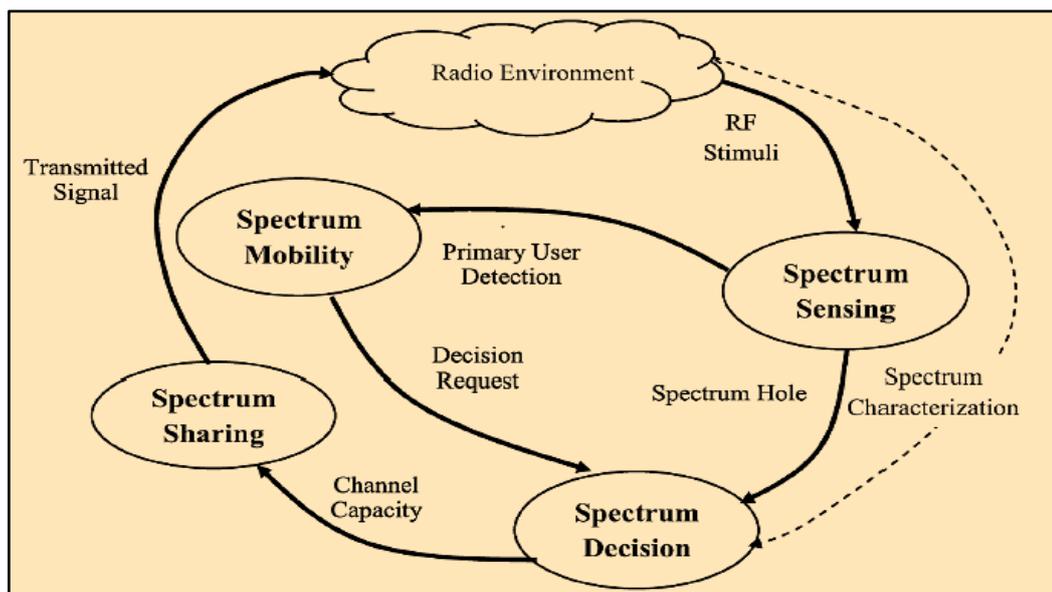


Figure I.6: La capacité cognitive [17]

##### 1. Détection du spectre (Spectrum Sensing)

C'est l'une des fonctions basique de la RC, consiste à détecter les portions vides, inutilisées du spectre et les partager d'une manière nuisible à d'autres utilisateurs licenciés, ils existent plusieurs techniques de détection du spectre parmi elles on peut citer :

### a. La détection de l'émetteur primaire

Détecter un émetteur primaire revient à détecter les signaux faibles procédant des émetteurs primaires dans sa portée, cette technique a comme défi les interférences qui gêne l'utilisateur secondaire (SU) à accéder aux informations des utilisateurs primaires.

### b. La détection du récepteur primaire

Cette technique repose notamment sur la détection des récepteurs primaires qui reçoivent des données dans la portée des utilisateurs secondaires, elle est caractérisé par l'efficacité de la détection des trous<sup>3</sup> du spectre (Spectrum Hole) (voir la **Figure I.7**).

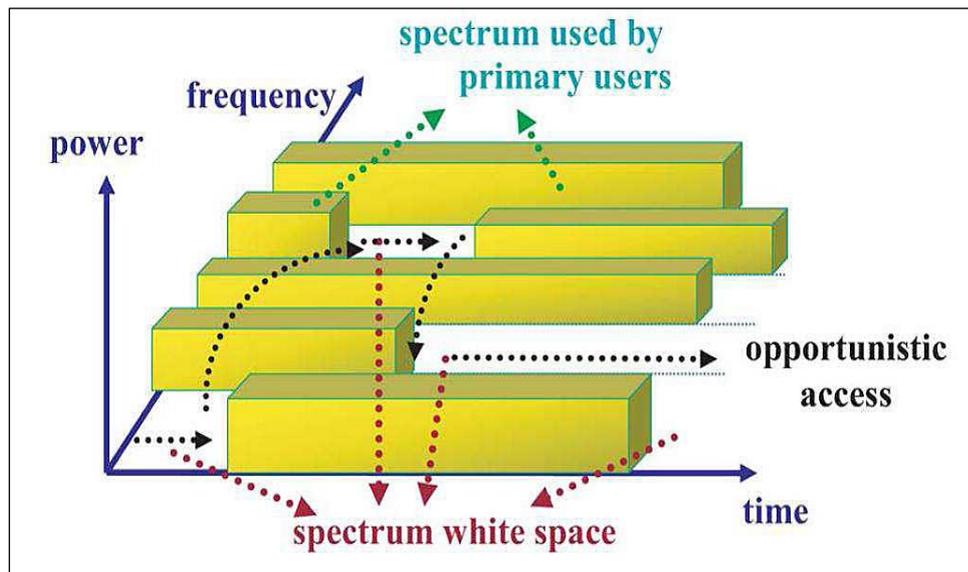


Figure I.7: Les trous du spectre [11]

## 2. Gestion du spectre (Spectrum management)

La gestion du spectre est une technique qui consiste à capturer les meilleures bandes de fréquences disponibles pour répondre aux exigences des utilisateurs, elle est réalisée par les fonctions suivantes :

### a. Analyse du spectre

L'analyse du spectre est présentée comme étant le moyen d'observer l'activité sur le spectre de fréquences, pour assurer que la transmission d'un utilisateur licencié PU n'est pas brouillée si le secondaire SU décide d'accéder, elle sert aussi à répondre d'une manière exacte aux exigences de l'utilisateur équipé d'une RC, et pour estimer la qualité du spectre, cette qualité peut être caractérisée par la corrélation des espaces blancs, la

<sup>3</sup> **Trou du spectre :** La RC surveille les bandes spectrales qui sont à sa portée pour détecter les trous spectraux, qui sont des bandes de fréquences non utilisées par les utilisateurs licenciés.

durée moyenne, le taux d'erreur dans le canal, l'activité du PU et le débit. Pour analyser le spectre, de nombreuses techniques sont employées tel que les algorithmes d'apprentissages de l'intelligence artificielle.

**b. Décision sur le spectre**

La prise de la décision est nécessaire pour l'accès au spectre, elle dépend des résultats retenues par la phase d'analyse du spectre; une multitude de règles décisionnelles est appliquée afin de déterminer la ou les bandes les plus adaptées à la transmissions en cours [29].

**3. Mobilité du spectre (Spectrum Mobility)**

De l'anglais (Spectrum Handoff), défini comme étant le procédé de changement de fréquence de l'opérabilité d'un utilisateur opportuniste, elle lui permet de basculer vers une autre bande libre grâce à un trou du spectre, donc utiliser le spectre d'une façon dynamique [12].

Les auteurs dans l'étude [2] soulignent qu'il est essentiel que la mobilité spectrale ait connaissance de la durée du Spectrum handoff, cette information est assurée par les algorithmes de sondage spectral. Dès la disponibilité de cette latence, les algorithmes de la mobilité spectrale s'assurent que la communication en cours subisse le moins de dégradation lors du changement de fréquence.

**IV.5 Domaines d'application de la radio cognitive**

La radio cognitive a touché plusieurs domaines, on peut noter les cinq les plus appropriées [6] :

**1. Les réseaux sans fil de la prochaine génération**

La future génération des réseaux sans fils hétérogènes est vraiment prometteuse et la radio cognitive en est la technologie clé qui pourrait résoudre le problème d'encombrement du spectre électromagnétique.

**2. Coexistence de différentes technologies sans fil**

La radio cognitive est considérée comme étant une résolution. Elle prône la coexistence de multiples technologies sans fil, par exemple l'IEEE 802.22 basée sur les utilisateurs WRAN peut utiliser efficacement la bande TV quand il n'y a pas d'utilisation du téléviseur à proximité ou quand une station de télévision ne diffuse pas.

### 3. Réseaux d'urgence

Les réseaux d'urgences ont la possibilité de tirer profit des concepts de la radio cognitive pour assurer la fiabilité et la flexibilité de communication sans fil.

### 4. Services de cyber santé (E-Health services)

Le concept de la RC peut être employé dans certains services médicaux tels que la prise en charge des patients et la gestion des soins de santé, où les équipements et les appareils utilisent la transmission RF comme il est montré dans la **Figure I.8**. Quant à l'usage du spectre, il doit être adopté avec soin et attention pour interdire tout brouillage.

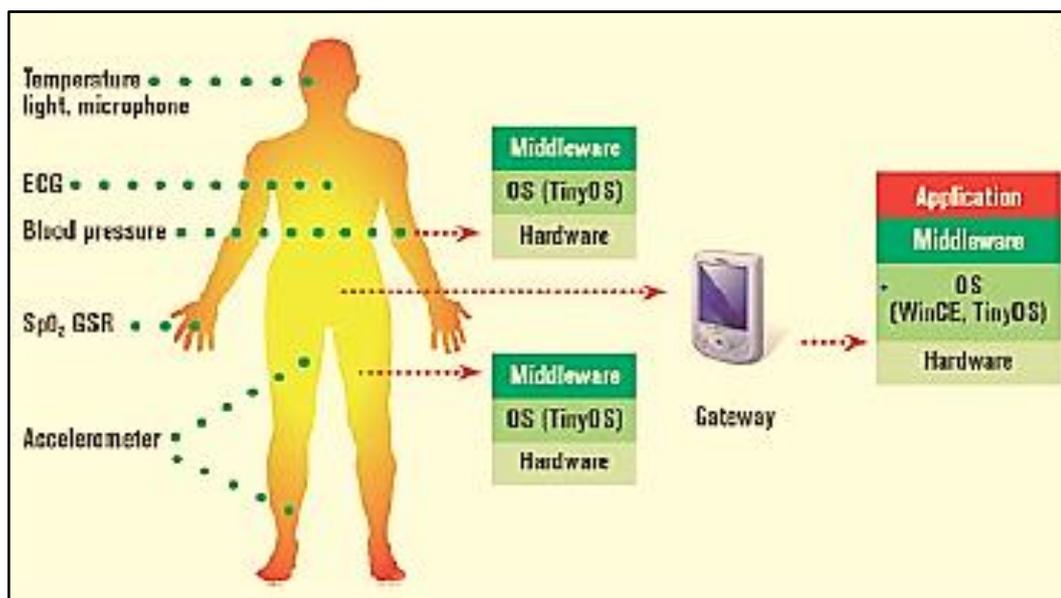


Figure I.8: RC, WBAN, Capteurs [6]

## V. Conclusion

L'objectif de ce chapitre a consisté à présenter la radio cognitive, ses composantes, ses fonctionnalités, ainsi que sa frontière avec la radio logicielle.

Le chapitre suivant sera consacré à présenter les notions de métaheuristiques en se focalisant sur une métaheuristique que nous avons utilisée dans ce PFE à savoir « la recherche par Harmonie ». Cette métaheuristique sera implémentée pour l'optimisation de la qualité de service dans un réseau de radio cognitive.

## *Chapitre II*

# *Algorithme de la recherche par harmonie*

## Chapitre 2 : Algorithme de la recherche par Harmonie

### I. Introduction

Quotidiennement les ingénieurs et les scientifiques se heurtent et se disputent à distingues problèmes de complexité dans des différents secteurs y compris la télécommunication, la médecine, la fouille de données, la recherche opérationnelle, la conception des systèmes mécaniques et électroniques etc. Ces problèmes peuvent être formulées sous genre de problème d'optimisation ; qui sont caractérisées par le faite qu'ils sont souvent faciles à décrire, mais leur résolution n'est pas habituellement aisée, nécessitant pour les résoudre un nombre grand de ressources matérielles et logicielles [25].

Résoudre un tel problème revient à rechercher une solution de bonne qualité dite optimum au regard d'un (des) critère(s) donné(s) et des fonctions objectifs à satisfaire, un exemple très simple est le cas d'une usine où on veut chercher à ordonnancer la chaîne de production pour qu'elle satisfasse différents objectifs tel que minimiser le nombre de commandes livrées en retard aux différents clients ou encore terminer le travail le plus rapidement possible [25].

Il existe plusieurs méthodes pour la résolution des problèmes d'optimisation, ces méthodes se déclinent en deux classes : les méthodes exactes et les méthodes approchées, d'où les méthodes exactes (dites aussi les méthodes complètes) permettent d'aboutir à une solution ou plusieurs dont l'optimalité est garantie mais dans un temps un peu grand. Pire encore, elles sont quelquefois inutilisables puisque les pré requis nécessaires à leur marche ne peuvent tout simplement pas être rencontrés. Il est nécessaire par conséquent de trouver des modes de résolution qui permettant d'aboutir à des solutions dans un temps de calcul minime, des solutions non optimaux mais de la bonne qualité [4].

Pour ces raisons-là, on applique les méthodes approchées qui sont principalement basées sur les heuristiques et les métaheuristiques. Ce chapitre est consacré à une métaheuristique qui appartient à la famille d'algorithmes d'optimisation combinatoire,

visé à résoudre les problèmes de type NP-difficiles<sup>4</sup> pour lesquels on ne connaît pas de méthodes classiques plus efficaces. Nous commençons par une présentation générale, suivie d'une section consacrée aux principes des métaheuristiques, ses caractéristiques les plus répandues. Enfin nous présentons d'une manière détaillée l'algorithme de la recherche par Harmonie, que nous avons adapté pour la résolution de notre problème.

## **II. Notions fondamentales sur les métaheuristiques**

### **II.1 Terminologies**

Le mot métaheuristique est composé de deux mots grecs [5] :

- Heuristique du verbe grec "heuriskein" (εὐρίσκειν) qui signifie découvrir ou trouver.
- le suffixe méta du grec « au-delà » comprend ici « à un plus haut niveau » ou « dans un niveau supérieur »

D'une manière littéraire une métaheuristique indique un changement de niveau ou un passage à un niveau « supérieur » pour manipuler des informations de niveau inférieur [26].

### **II.2 Présentation des heuristiques**

L'utilisation d'une méthode heuristique offre plus d'avantages par rapport à l'utilisation d'une méthode exacte<sup>5</sup> qui présente généralement une méthode non flexible, et qui aboutit à des solutions optimales mais non garanties, aussi, elle est beaucoup plus lente ce qui provoque des difficultés au niveau des coûts informatiques supplémentaires et de temps de réponse [1].

---

<sup>4</sup> Problèmes NP-difficiles : problèmes qui peuvent être résolus en temps polynomial comme par exemple le problème de voyageur de commerce ou le problème de sac à dos.

<sup>5</sup> Une méthode exacte : appelée aussi méthode complète permis de trouver des solutions optimales pour des problèmes de taille raisonnable, elle rencontre généralement des difficultés face aux applications de taille importantes, exemple des méthodes complètes la programmation dynamique, la programmation linéaire et Branch & Bound.

Pour la bonne raison qu'une heuristique est une méthode de calcul approchée simple conçue à un problème d'optimisation donné, permet d'orienter et de guider le processus dans sa recherche à des solutions faisables pas obligatoirement optimale mais proche de l'optimalité. Les heuristiques se caractérisent par le fait qu'elles sont simples, flexibles et faciles à mettre en œuvre, rapides en terme de temps de réponse, en contrebalance, elles n'offrent aucune garanties quant à l'optimalité de la meilleure solution trouvée surtout pour les problèmes NP-difficiles [1].

Une autre définition des heuristiques : dis qu'une heuristique « est une règle d'estimation, une stratégie, une astuce, une simplification, ou tout autre sorte de système qui limite drastiquement la recherche des solutions dans l'espace des configurations » [4]

Vis-à-vis les difficultés rencontrées par les heuristiques pour avoir une bonne solution pour des distincts problèmes d'optimisation, les métaheuristiques ont fait leur apparition.

### **II.3 Présentation des Métaheuristiques**

Le terme métaheuristique a été introduit par Glover en 1986, dont l'objectif est de distinguer et différencier la recherche avec tabous des autres heuristiques, elles sont apparues afin de dénouer au mieux les problèmes d'optimisation NP-difficiles [25].

Les métaheuristiques sont définies aussi comme « un ensemble de concepts utilisés pour définir des méthodes heuristiques, pouvant être appliqués à une grande variété de problèmes [5].

D'après plusieurs définitions que nous avons vu, on peut définir d'une manière simple une métaheuristique comme étant une méthode approchée polyvalente de type stochastique applicable à un large genre de problèmes donc n'est pas propre ou liée à un problème précis, elle cherche un objet mathématiques (vecteur,..) tout en maximisant ou minimisant une fonction objectif (fitness) qui décrit la qualité d'une solution au problème.

Une caractéristique importante du métaheuristique est que sa évolution se fait d'une manière itérative, Donc nous pouvons à tout moment arrêter l'algorithme et récupérer la meilleure solution trouvée jusqu'à présent, donc ce n'est pas obligé d'attendre la fin de l'exécution pour obtenir un résultat mais le moment où l'on désire.

La seule différence entre les méthodes métaheuristiques et les méthodes heuristiques c'est que les métaheuristiques sont applicables sur de nombreux problèmes. Tandis que, les heuristiques sont spécifiques à un problème  $X$  donné.

## **II.4 Classification**

Les métaheuristiques peuvent être classées selon plusieurs critères, on peut citer:

### **1. Leur manière d'utiliser la fonction objective**

Dans cette catégorie on peut différencier deux types de métaheuristiques : statique et dynamique. Étant donné un problème d'optimisation qui consiste à maximiser une fonction  $f$  sur l'espace de solutions  $S$ , la métaheuristique statique travaille directement sur  $f$  alors que la métaheuristique dynamique fait usage d'une autre fonction  $H$  obtenue à partir de  $f$  en ajoutant quelques composantes qui permettent de modifier la topologie de  $S$  [23].

### **2. Le nombre de solutions**

On peut distinguer des métaheuristiques à base de solution unique et les métaheuristiques à base de population de solutions comme il est montré dans la

**Figure II.1**

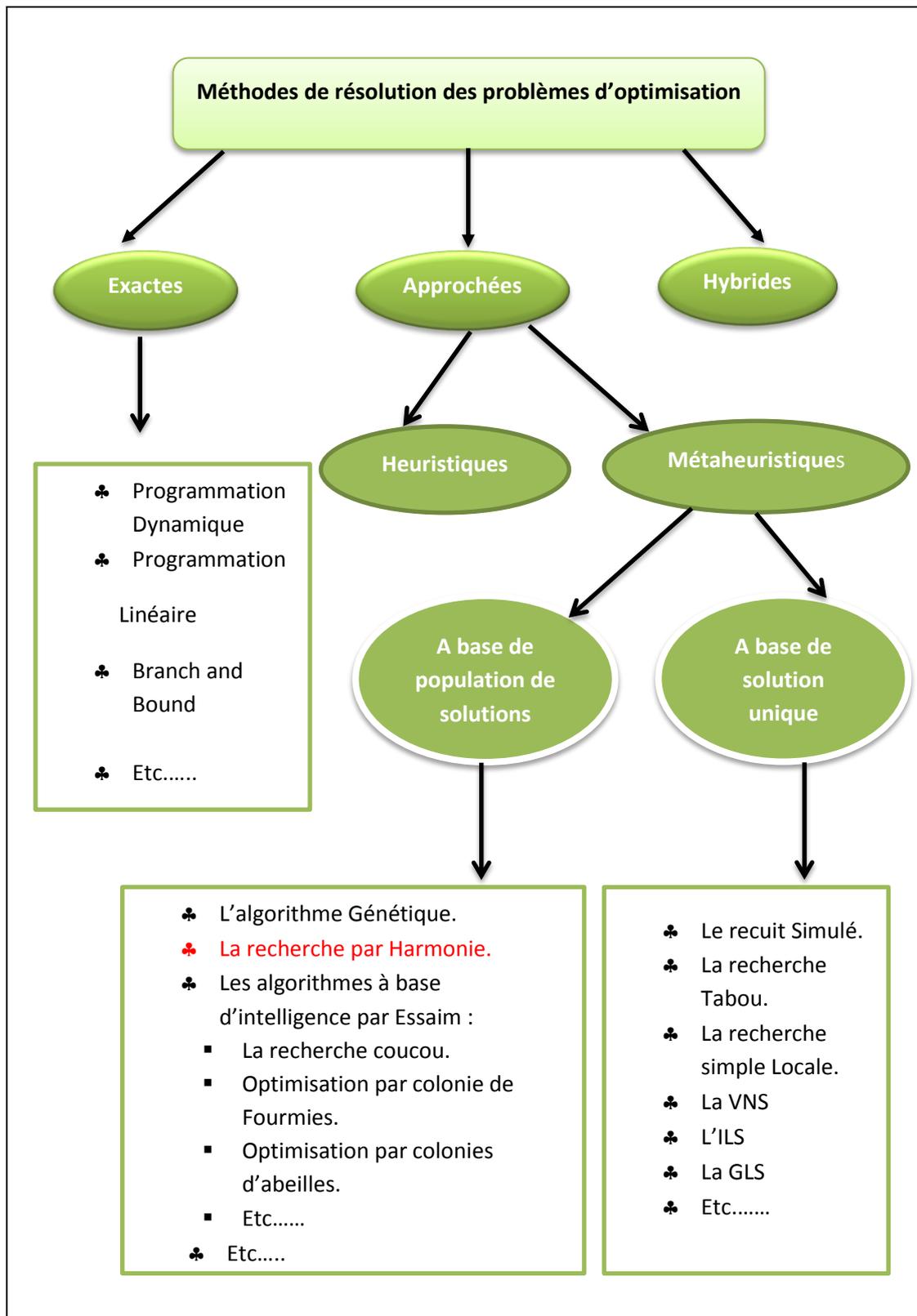


Figure II.1 : Classification des méthodes de résolution de problèmes d'optimisation [4]

**a. Les métaheuristiques à base de solution unique (méthodes locales)**

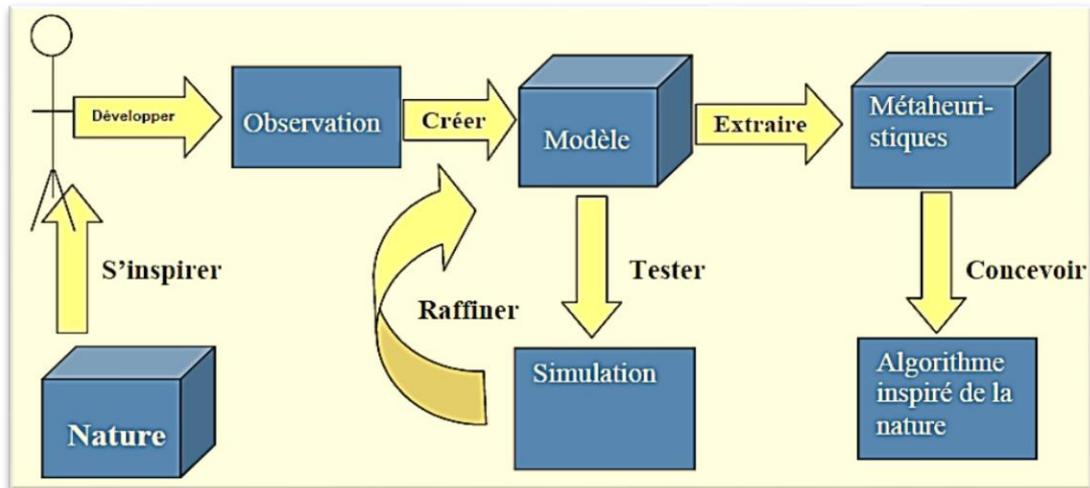
Cette sorte de métaheuristiques lance la recherche avec une solution initiale, et essaye au fur et à mesure d'améliorer sa qualité au cours de la procédure de recherche tout en choisissant une nouvelle solution dans son voisinage, ils sont appelés aussi les méthodes de recherche locale ou méthodes de trajectoire car ils construisent une trajectoire dans l'espace des solutions tout en se redirigeons vers des solutions optimales, le recuit simulé, la recherche tabou, la recherche à voisinage variable (VNS: Variable Neighbourhood Search) sont des instances typiques des méthodes à base de solution unique.

**b. Les métaheuristiques à base de population de solutions**

Ce type de métaheuristiques débute la recherche avec un ensemble de solutions dites population, elle essaye pas à pas durant les itérations du processus de recherche d'améliorer leurs qualités afin d'aboutir à des solutions de meilleurs performance. Ils sont parfois nommées des méthodes évolutives parce qu'elles font évoluer une population d'individus selon des règles bien précises, l'intérêt de cette forme de métaheuristiques est d'utiliser la population comme facteur de diversité pour augmenter la possibilité d'apparition de bonnes solutions en terme de qualité, les exemples les plus connus de ces méthodes sont : les algorithmes génétiques, l'optimisation par essaim de particules, les algorithmes de colonies de fourmis, la recherche coucou et la recherche par harmonie.

**3. Suivant la source d'inspiration**

On peut distinguer les métaheuristiques qui s'inspirent de faits naturels comme il est illustré dans la **Figure II.2** tel que les algorithmes génétiques, les algorithmes d'optimisation par colonies de fourmis, la recherche coucou et celles qui ne s'en inspirent pas, par exemple la méthode Tabou et la recherche d'harmonie etc.



**Figure II.2 :** Passage d'un phénomène naturel à un algorithme inspiré de la nature [16]

## II.5 Les principales caractéristiques de métaheuristiques

Les deux majeurs caractéristiques de n'importe quelle métaheuristique sont l'intensification et la diversification, dites respectivement l'exploitation et l'exploration.

### 1. La diversification

C'est un mécanisme qui permet d'explorer l'espace de recherche  $S$  d'une façon suffisamment large. Il se fait en favorisant l'exploration des meilleurs voisins d'une solution donnée.

### 2. L'intensification

Nous pouvons la définir comme étant le moyen de concentration sur une zone intéressante dans l'espace de recherche, il permet de rechercher des solutions de plus grande qualité en s'appuyant sur les solutions déjà découvertes.

Les deux caractéristiques sont complémentaires, il s'agit d'une part d'intensifier l'effort de recherche vers les zones les plus encourageantes de l'espace de recherche  $S$  et d'une autre part de diversifier l'effort de recherche de façon d'être plus capable de découvrir de nouvelles zones qui contiennent des meilleurs combinaisons, donc une meilleure combinaison entre ces deux caractéristiques assurera la convergence sûre vers un optimum global [15].

La différence principale entre l'intensification et la diversification réside dans le fait qu'une phase d'intensification se concentre sur le test du voisinage d'une solution élue. Tandis qu'une phase de diversification encourage le processus de recherche à examiner

des régions non visitées et à découvrir des solutions différentes aux solutions rencontrées dans des points divers [3].

### III. La recherche par harmonie

#### III.1 Introduction

A l'inverse de certaines métaheuristiques qui s'inspirent des phénomènes naturels, nous sommes intéressées à une métaheuristique qui s'appelle la recherche par harmonie (RH), en anglais (Harmony Search), proposée par Geem et ses collègues, cette recherche s'inspire du processus de recherche de la meilleure harmonie musicale dans un orchestre musical de Jazz, où chaque musicien joue une note avec des différents instruments musicaux à la fois pour trouver l'harmonie parfaite. L'algorithme RH a été appliqué avec succès sur multiples problèmes comme le problème du voyageur de commerce, la planification de la tournée, le problème de tournée de véhicule, la conception de réseau d'eau et le problème de conception des Sudoku puzzle, le carré magique, l'imagerie médicale, l'analyse de données astronomiques nature [19].

#### III. 2 L'algorithme de la recherche par harmonie (Harmony search)

L'algorithme comprend six étapes essentielles :

##### Etape 1 : initialisation des paramètres

Dans cette étape, les paramètres de l'algorithme sont initialisés:

- ❖ La taille de la mémoire d'harmonies (population de solutions) notée par HMS (de l'anglais : Harmony Memory Size), elle varie généralement de 1 à 100.
- ❖ Le taux de sélection ou de considération de la mémoire harmonique notée par HMCR (de l'anglais: Harmony Memory Considering Rate) avec  $HMCR \in [0, 1]$ , c'est le taux d'élire ou de sélectionner une valeur de la mémoire d'harmonie, elle varie généralement de 0,7 à 0,99.
- ❖ Le taux d'ajustement notée par PAR (de l'anglais: Pitch Adjusting Rate), représentant la probabilité d'apporter quelques modifications à un élément de la mémoire d'harmonie avec  $PAR \in [0,1]$ .
- ❖ Le critère d'arrêt NI (nombre d'improvisations ou itérations) généralement représente un nombre maximum de recherches.

**Etape 2 : génération des solutions initiales (appelé mémoire de l’harmonie HM)**

La mémoire d’harmonie est une matrice de solutions de taille HMS ou chaque vecteur représente une solution du problème traité, c’est l’équivalent d’une harmonie dans la music. Dans cette étape la matrice HM est remplie aléatoirement, les valeurs générées seront stockées dans cette matrice, et pour chaque solution i (i=1,..., HMS) la fonction objectif fi est calculée. La **Figure II.3** représente la structure générale de la mémoire d’harmonie.

$$\mathbf{HM} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1^1 & \dots & \mathbf{x}_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{x}_1^{\mathbf{HMS}} & \dots & \mathbf{x}_n^{\mathbf{HMS}} \end{pmatrix}$$

**Figure II.3** : Structure de la mémoire d’harmonie

**Etape 3 : improvisation<sup>6</sup> d’une nouvelle harmonie (solution) à partir de la HM**

C’est l’étape la plus importante de l’algorithme ou un nouveau vecteur est généré en s’appuyant sur trois règles idéalisée : la considération de la mémoire HM, l’ajustement de lancement et le choix aléatoire.

**i. La considération de la mémoire**

En utilisant le paramètre HMCR qui est défini comme la probabilité de choisir une valeur historique stockée dans HM, chaque variable xi (i=1,..., n) du nouveau vecteur est choisie aléatoirement du vecteur ((y1) i, ..., (yHMS) i) de la matrice HM, alors que (1-HMCR) est déterminé comme la probabilité d’élire aléatoirement une valeur à partir de la plage possible des valeurs, c’est l’équivalent du choix aléatoire.

Si ce taux est trop faible, seulement quelques meilleures harmonies seront choisies pour la nouvelle improvisation et peuvent converger trop lentement et Si c’est extrêmement haute (près de 1), pratiquement tous les harmonies sont utilisés dans HM.

Par exemple si le HMCR égal à 0.90, ça indique que l’algorithme choisira une valeur d’une variable avec une probabilité de 90% à partir de la HM, alors que (1-HMCR) qui est égal à (100%-90%) est défini comme la probabilité de choisir aléatoirement une valeur à partir de la gamme possible des valeurs [10].

<sup>6</sup> Improvisation : génération

ii. L'ajustement de pitch

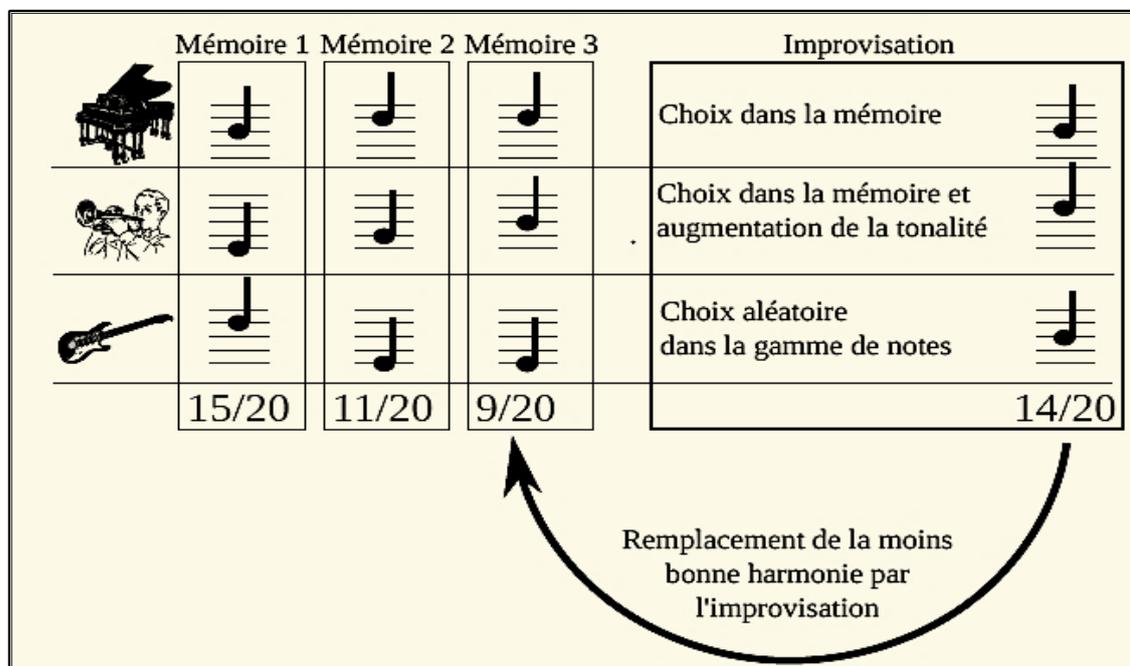
Tout élément du nouveau vecteur d'harmonie obtenu à partir de l'étape de la considération de mémoire est testé pour déterminer s'il devrait être modifié et ajusté pour le lancer; cette opération utilise le taux PAR qui représente la probabilité d'ajustement de lancement.

Le nouvel élément du nouveau vecteur  $X_{nouveau}(i)$  égal au élément  $i$  du vecteur élu est qui présente le vecteur sélectionné à partir de la mémoire d'harmonie plus un pourcentage  $\epsilon \in [0,1]$  multiplié par l'élément  $i$  du vecteur voisin est qui présente un voisin dans le rang  $i$  du élément élu

$$D'où \quad X_{nouveau}(i) = X_{élu}(i) + \epsilon * X_{voisin}(i).$$

**Etape 4 : la mise à jour de mémoire d'harmonie ou le remplacement**

Si la nouvelle solution (nouveau vecteur) est faisable et meilleure que la plus mauvaise solution dans la matrice HM en termes de valeur de fonction objectif alors le nouveau vecteur (nouvelle harmonie) est incluse dans HM et la plus mauvaise harmonie existante est exclue de HM, la **Figure II.4** montre la notion de remplacement dans un processus d'improvisation.



**Figure II.4:** Le remplacement de la mauvaise par la bonne harmonie dans HM [22]

### Etape 5 : vérification du critère d'arrêt

L'amélioration et la mise à jour seront refaites jusqu'à la satisfaction du critère d'arrêt sinon l'étape de création de la population initiale et l'étape de génération de nouvelles solutions seront répétées.

L'algorithme de la recherche d'harmonie est présenté ci-dessous sous forme d'un organigramme (voir **Figure II.5**)

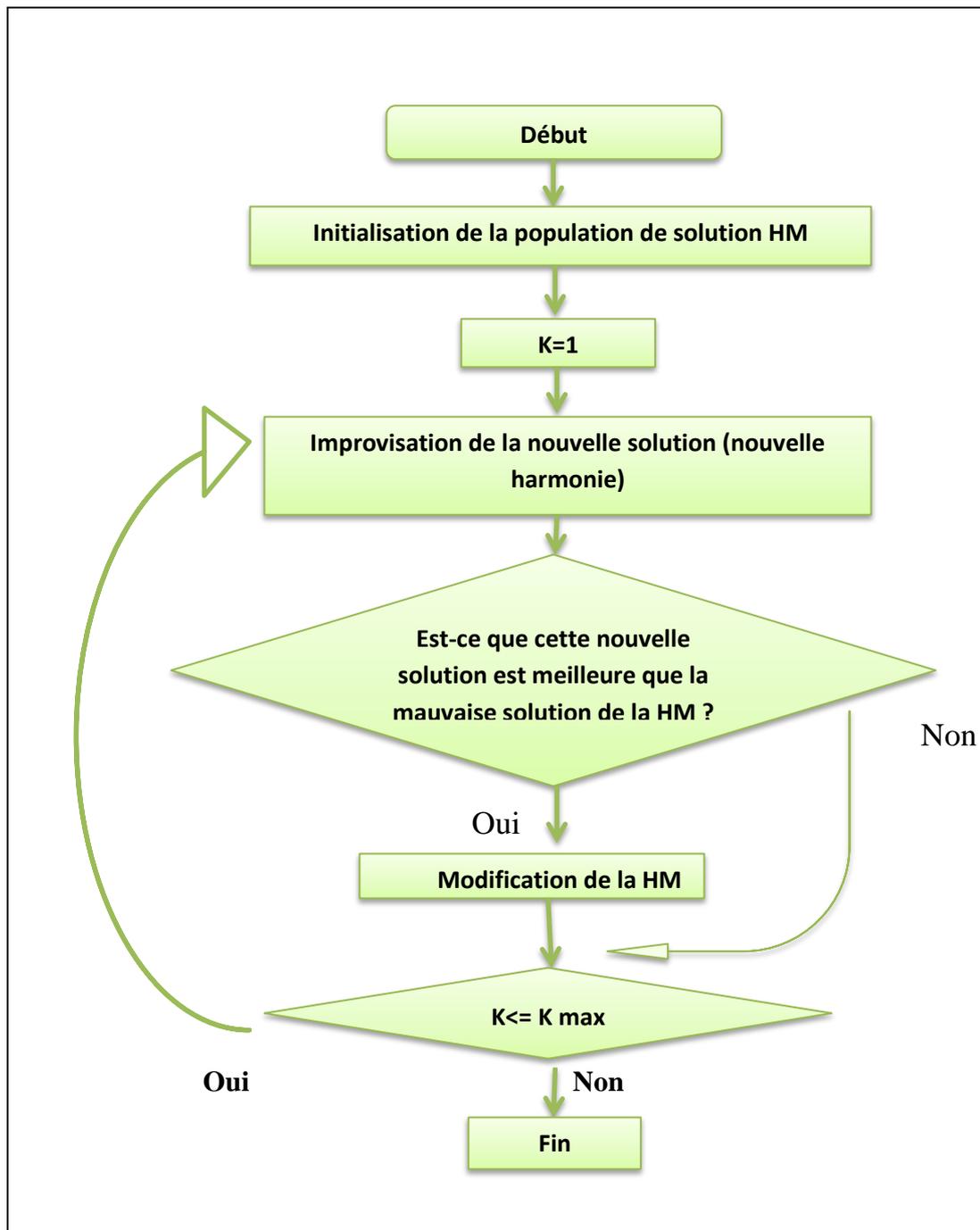


Figure II.5: Organigramme de l'algorithme HS [20]

### III.3 Analogie entre la musique d'improvisation et l'optimisation

La Figure II.6 montre les détails de l'analogie entre l'improvisation de musique et l'optimisation technique, où chaque musicien guitariste, contrebassiste, saxophoniste peut correspondre à chaque variable de décision ( $x_1$  f100; 200; 300 ); ( $x_2$  f300; 400 ;500); ( $x_3$  f500; 600; 700) dont la gamme de chaque instrument de musique sont le saxophone (DO, Ré , Mi); le contrebasse (Mi, Fa, SOL); et la guitare (Sol, La, Si), Si

le saxophoniste joue la note de Do, le bassiste cueille Mi, et le guitariste cueille Sol, leurs notes forment ensemble une nouvelle harmonie (Do, Mi, Sol). Si cette nouvelle harmonie est mieux que l'harmonie existante, la nouvelle harmonie est stockée dans la mémoire de chaque joueur. Le nouveau vecteur de solution (100mm, 300mm, 500mm) est maintenu s'il est meilleur que l'harmonie existante en termes de valeurs de la fonction objective, la qualité de l'harmonie est améliorée par la pratique après l'entraînement [19].

De même dans l'optimisation de l'ingénierie, chaque variable de décision  $x_i$  correspond à une note qui sort de l'instrument  $i$ , une harmonie correspond à un vecteur de solution, et l'esthétique musicale correspond à la fonction objective à maximiser ou à minimiser.

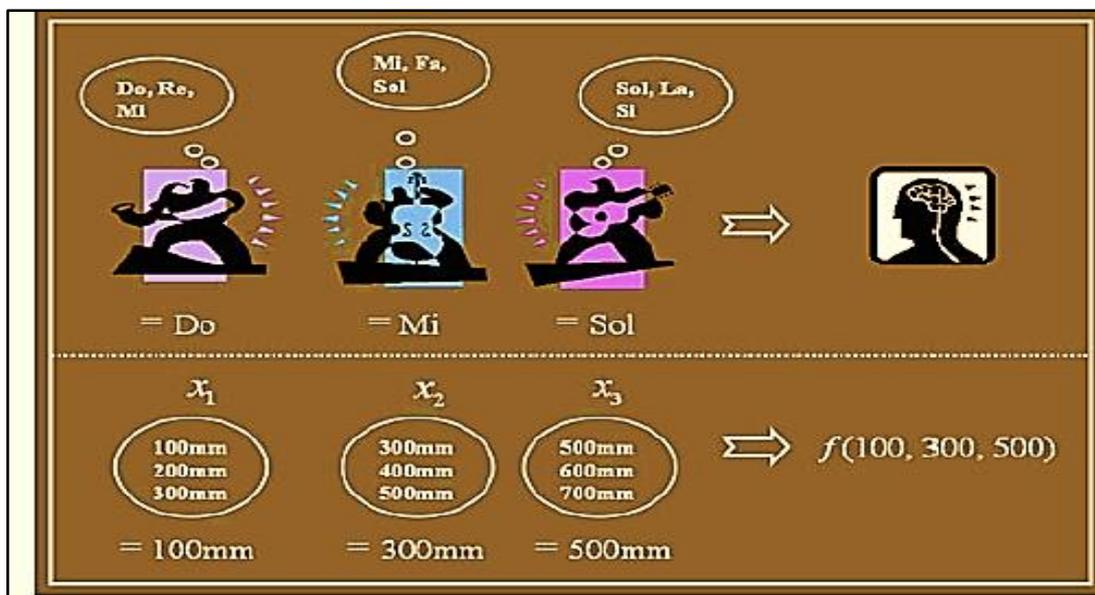


Figure II.6: L'analogie entre la musique d'improvisation et l'optimisation [19]

### III.4 Les avantages de la recherche par Harmonie

L'algorithme de recherche par harmonie a prouvé sa capacité dans de nombreuses applications grâce à multiples avantages parmi eux on peut citer :

- Facile à mettre en œuvre.
- Possède une grande capacité de trouver l'optimum global.
- Il peut échapper les optimums locaux.
- Il peut gérer des variables discrètes ainsi que les variables continues.
- Les utilisateurs novices peuvent facilement utiliser l'algorithme.

- Certaines variantes du HS ne nécessitent pas de paramètres de l'algorithme tels que HMCR et PAR.

## **IV. Conclusion**

Nous avons pu présenter dans ce chapitre l'essentiel sur les métaheuristiques, en particulier l'algorithme de la recherche par harmonie qui présente une métaheuristique très importante afin de résoudre les problèmes d'optimisation.

Cette métaheuristique a été appliquée à des problèmes diversifiés au cours des dernières années et les résultats sont très efficaces par rapport à d'autres algorithmes de métaheuristique car il est très flexible pour la mise en œuvre et facile à appliquer et à manipuler.

# *Chapitre III*

## *Implémentation de l'application et évaluation des résultats*

### Chapitre 3 : Implémentation de l'application et évaluation des résultats

#### I. Introduction

Le chapitre précédent, nous a permis de donner une vue complète sur le concept des métaheuristiques, spécialement l'algorithme de recherche par harmonie. Nous pouvons conclure que cet algorithme est un algorithme primitif et simple à engendrer. La difficulté primordiale réside dans le choix des valeurs appropriées de ses distincts paramètres à savoir : la taille de la population, le nombre d'itérations ou générations, le taux de sélection HMCR et la probabilité de modification PAR. Le réglage de ces paramètres a un impact intéressant sur la convergence de l'algorithme et sur la qualité des résultats obtenus. L'algorithme de «recherche par harmonie» a prouvé dernièrement son utilité dans plusieurs domaines spécialement pour les problèmes d'optimisation, parmi les études accomplies dans ce domaine on peut mentionner l'étude de Newman [28] dont les auteurs sont optés à un paramétrage normalisé ou tous les paramètres sont fixés à l'avance et que le nombre de canaux disponibles est à l'ordre de 64.

Pendant la première partie de ce chapitre, nous développons une approche par l'algorithme de la recherche par harmonie pour le problème de l'optimisation de la QoS dans les réseaux de radio cognitive, ensuite pour la deuxième partie, nous présentons les simulations qui ont été faites dont le but d'étudier les différents résultats en termes de valeurs données aux distincts paramètres de la méthode.

#### II. La fonction objective

La fonction objective (de l'anglais fitness function) est la présentation mathématique de besoin ou exigence de l'utilisateur (ce qu'il veut optimiser), on peut la définir autrement comme étant la relation entre le problème physique et le processus d'optimisation, et qui permet de mesurer la pertinence d'une solution et aussi ramener à partir d'un large espace la meilleure solution [18].

Comme on a déjà vu précédemment, la radio cognitive permet à un utilisateur de configurer ses paramètres de transmission (puissance de transmission, type de modulation) dynamiquement en tenant compte de son état interne (économie d'énergie,

## Chapitre 3 Implémentation de l'application et évaluation des résultats

performance élevée) et externe (le fading du signal, les autres utilisateurs), alors la fonction objective présente mathématiquement la QoS en fonction de ces paramètres.

A noter que la QoS dans le domaine de télécommunication est liée aux trois critères suivants :

- ❖ Critère 1 : La maximisation de débit.
- ❖ Critère 2 : La minimisation de taux d'erreur.
- ❖ Critère 3 : La minimisation de la consommation énergétique.

La présentation mathématique (la fonction objective) de ces trois critères selon l'étude [19] est défini comme suit dans le **tableau III.1**

Critères	
Minimisation du taux d'erreur	$1 - \frac{\log_{10}(0.5)}{\log_{10}(P_{be})}$
Maximisation du débit	$\frac{\log_2(M)}{\log_2(M_{max})}$
Minimisation de la consommation d'énergie	$1 - \frac{P_i}{n \times P_{max}}$

**Tableau III.1:** Formulation mathématique des trois critères [28]

### III. Définition des paramètres

Les différents paramètres des critères cités ci-dessus sont définis dans le

**Tableau III.2 :**

Paramètre	Définition
<b>P<sub>be</sub></b>	Le taux d'erreur moyen sur n canaux
<b>M</b>	L'index de modulation
<b>M<sub>max</sub></b>	L'index de modulation maximale
<b>P<sub>i</sub></b>	La puissance du signal sous la porteuse i
<b>P<sub>max</sub></b>	La puissance maximale
<b>N</b>	Le taux de bruit
<b>n</b>	Le nombre de canaux par individu

**Tableau III.2:** Définition des différents paramètres [28]

## Chapitre 3 Implémentation de l'application et évaluation des résultats

Comme il est déterminé dans le tableau précédent,  $P_{be}$  présente le taux d'erreur moyen sur  $n$  canaux, il est spécifique pour chaque type de modulation, le **Tableau III.3** définit la valeur de ce paramètre selon les trois types de modulation utilisée :

Types de modulation	$P_{be}$
B PSk	$Q\left(\sqrt{\frac{P}{N}}\right)$
M-ary PSk	$\frac{2}{\log_2(M)} Q\left(\sqrt{2 \times \log_2(M) \times \frac{P}{N} \times \sin \frac{\pi}{M}}\right)$
M-ary QAM	$\frac{2}{\log_2(M)} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q\left(\sqrt{\frac{3 \times \log_2(M) P}{M - 1 N}}\right)$

**Tableau III.3 :** La valeur de taux d'erreur selon les types de modulation [28]

Nous pouvons constater que les trois fonctions du **Tableau III.3** utilisent la fonction  $Q(x)$  qui présente la fonction d'erreur de Gauss, l'estimation de cette fonction représente [29]:

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

D'après les deux tableaux précédents **Tableau III.1** et **Tableau III.3**, nous remarquons bien que les objectifs et les paramètres s'interfèrent entre eux d'une façon conflictuelle, par exemple, pour minimiser le taux d'erreur, il est préférable d'augmenter la puissance de transmission des informations, ce qui affecte négativement sur la fonction de consommation d'énergie parce que ces deux derniers fonctions utilisent le même paramètre « la puissance  $P$  » mais dans un sens inverse. Or, pour maximiser le débit qui a pour résultat d'augmenter le nombre de bits envoyées par symbole donc augmenter le paramètre « l'index de modulation  $M$  » a un effet négatif sur la minimisation du taux d'erreur qui a pour but de minimiser le nombre de bits envoyées par symbole. Le tableau suivant (**Tableau III.4**) montre le conflit cité ci-dessus entre les paramètres et les fonctions objectifs :

L'objectif	Paramètre lié
Minimiser le taux d'erreur	P ↗, M ↘, N ↘
Maximiser le débit	M ↗
Minimiser la consommation d'énergie	P ↘

**Tableau III.4:** Relation entre les fonctions et les paramètres

Dans l'étude [28], l'approche utilisée définit la fonction objective comme étant la somme pondérée de ces trois objectifs (critères), les poids  $P_i$  sont présentés sous forme de nombres de types doubles associés à chaque critère, et qui traduisent leurs importances relativement à l'exigence de l'utilisateur. La somme de ces poids égal à 1.

$$\text{Fonction objective} = \left\{ \begin{array}{l} \text{poid1* fct de minimisation de taux d'erreur +} \\ \text{poid2* fct de maximisation de débit +} \\ \text{poid3* fct de minimisation de la consommation d'énergie.} \end{array} \right.$$

$$\sum_{i=1}^3 P_i = 1$$

Avec  $P_i \in [0,1]$

## IV. Les modes de transmission

L'utilisateur ne s'attache pas à tous optimiser à la fois, et qui est déjà impossible vu le conflit entre les différents objectives.

En effet, un mode de transmission est en fort rapport avec l'exigence de l'utilisateur en fonction de la qualité de service, on peut définir les modes de transmission comme suit :

### 1. Mode Urgence

Si l'utilisateur a comme exigence d'éviter les erreurs de transmission alors ce mode sera sélectionnée ou le poids le plus fort est donné à la fonction de minimisation de taux

## Chapitre 3 Implémentation de l'application et évaluation des résultats

---

d'erreur (0.80) tandis que le poids le plus faible (0.05) est affecté à la fonction qui est en conflit avec elle « maximisation de débit », l'autre fonction prend le poids intermédiaire (0.15), donc la formulation mathématique de la fonction objectif dans ce mode est présenté sous la forme :

$$\text{Fct objectif} = 0.80 * \text{Fct}(\text{min taux d'erreur}) + 0.15 * \text{Fct}(\text{min consommation}) + 0.05 * \text{Fct}(\text{max débit}).$$

### 2. Mode Batterie Faible

Si par exemple l'utilisateur a besoin de prolonger la vie de sa batterie pour ne pas tomber dans le cas d'une coupure de communication alors le poids le plus fort (0.80) est associé à la fonction de Minimisation de consommation énergétique or le poids faible (0.05) est raccordée à la fonction de minimisation de taux d'erreur, le poids intermédiaire (0.15) est attribué à la fonction de maximisation de débit, la formulation mathématique de la fonction objectif dans ce mode est présentée comme suit :

$$\text{Fct objectif} = 0.80 * \text{Fct}(\text{min consommation}) + 0.15 * \text{Fct}(\text{min taux d'erreur}) + 0.05 * \text{Fct}(\text{max débit}).$$

### 3. Mode Multimédia

Ce mode de fonctionnement est sélectionné, lorsque l'utilisateur a besoin d'un emploi intensif de la bande dans le cas d'une application purement multimédia (l'exemple d'une vidéo conférence : Skype..) ou la communication est en temps réel et il ne veut pas avoir une coupure ou une perte d'une séquence d'images, par conséquence le poids le plus élevé sera associée à la fonction de maximisation de débit, tandis que le poids le plus faible (0.05) est attribué à la fonction conflictuelle « minimisation du taux d'erreur », le poids intermédiaire revient à l'autre fonction de minimisation de la consommation d'énergie, la formulation mathématique de la fonction objective dans ce mode est présentée comme suit :

$$\text{Fct objectif} = 0.80 * \text{Fct}(\text{max débit}) + 0.15 * \text{Fct}(\text{min consommation}) + 0.05 * \text{Fct}(\text{min taux d'erreur}).$$

Le **Tableau III.5** résulte ce que nous venons de dire sur les modes de transmission :

Mode de transmission Fonctions	Poids		
	Urgence	Multimédia	Batterie Faible
Minimiser le taux d'erreur	0.80	0.05	0.15
Maximiser le débit	0.05	0.80	0.05
Minimiser la consommation d'énergie	0.15	0.15	0.80

Tableau III.5: Association des poids aux différents modes de transmission [29]

## V. Les paramètres utilisés

Dans la partie précédente, nous avons présenté en détail les modes de transmissions ainsi que leurs différents paramètres, nous avons montré que chaque mode de transmission dépend fortement de trois critères cités auparavant, nous avons aussi vu que ces trois fonctions dépendent des paramètres suivants : puissance de transmission et modulation. Dans l'étude [28] les paramètres utilisés sont généralement pris dans des intervalles bien définis, donc nous avons utilisé le même principe.

### 1. La puissance

L'intervalle des puissances de transmission prise correspond à 94 valeurs, varie entre 0.1 mW et 2.4808mW avec un incrément de 0.025mW, la valeur maximale de cet intervalle 2.04808mW a été élue vu que la valeur de puissance maximale utilisé dans la bande U-NII Low (Unlicensed-National Information Infrastructure [5.15-5.25 GHz]) est de 2.5 mW.

### 2. La modulation

Nous avons utilisé pour les simulations deux types de modulations, la première convient à la modulation PSK (phase Shift Keying), la deuxième correspond à la modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation) avec un index varie dans l'intervalle [0,5] donc on aura des modulations comme suit : 1, 2, 4, 8, 16, 32 QAM/PSK.

### 3. Le taux de bruit

Nous avons attribué pour chaque canal une valeur d'atténuation aléatoire varie dans l'intervalle] 0,1dB].

## VI. Le codage

Les différents paramètres cités ci-dessus, et qui présentent les composants d'un individu seront codés pour être manipuler. Le tableau suivant **Tableau III.6** et le **Tableau III.7** présente le codage de ces différents paramètres.

Codage de puissance	0	1	2	3	...	92	93
Valeur	0.1	0.1256	0.151	0.176	...	2.429	2.488 mw

**Tableau III.6:** Codage de la puissance

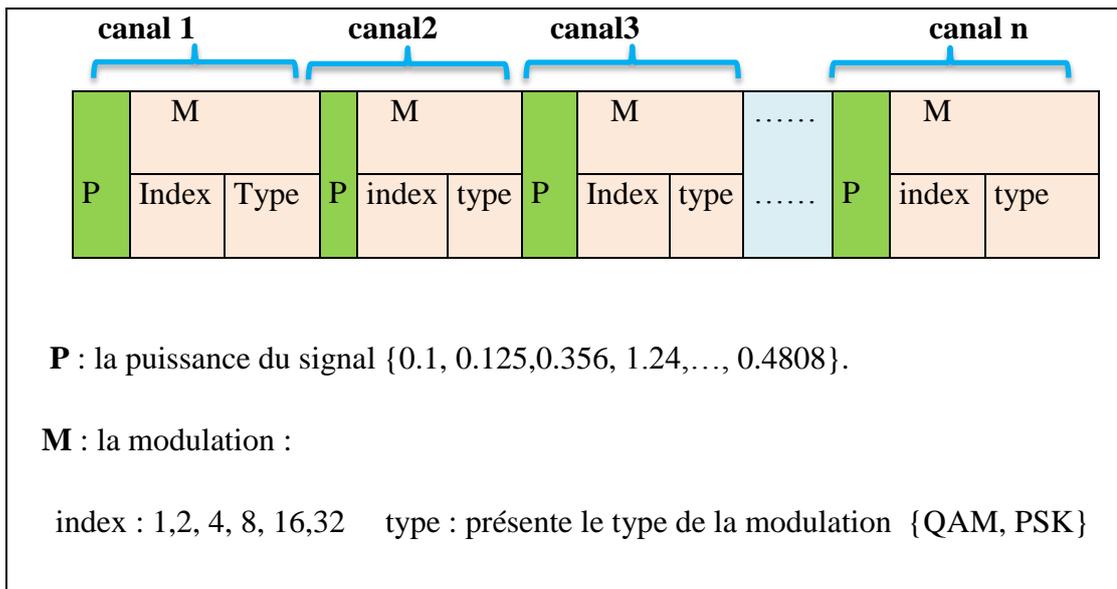
codage modulation	PSK	QAM
Valeur	0	1

**Tableau III.7:** Codage de la modulation

## VII.Application de l'algorithme

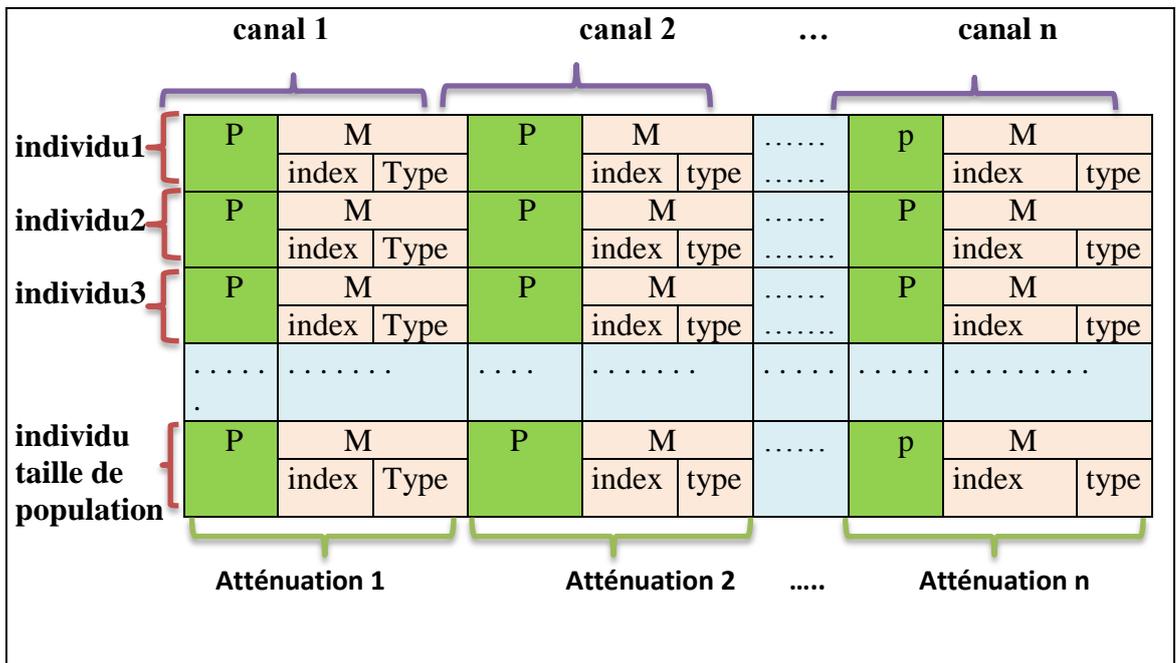
### 1. Initialisation de la population

Dans cette étape, une population de solutions est générée aléatoirement afin d'avoir un espace large de solution, voir la **Figure III.2** Chaque élément de notre population présente un individu composé de n canaux auquel l'individu va transmettre ses informations, la **Figure III.9** définit la forme d'un individu. La taille de la population utilisée dans notre contribution prend les valeurs suivantes : 20, 50, 100, 140 individus.



**Figure III.1:** Structure d'un individu

Alors, La population qui présente l'ensemble des individus est illustrée dans la **Figure III.2**



**Figure III.2:** Structure de la population de solution

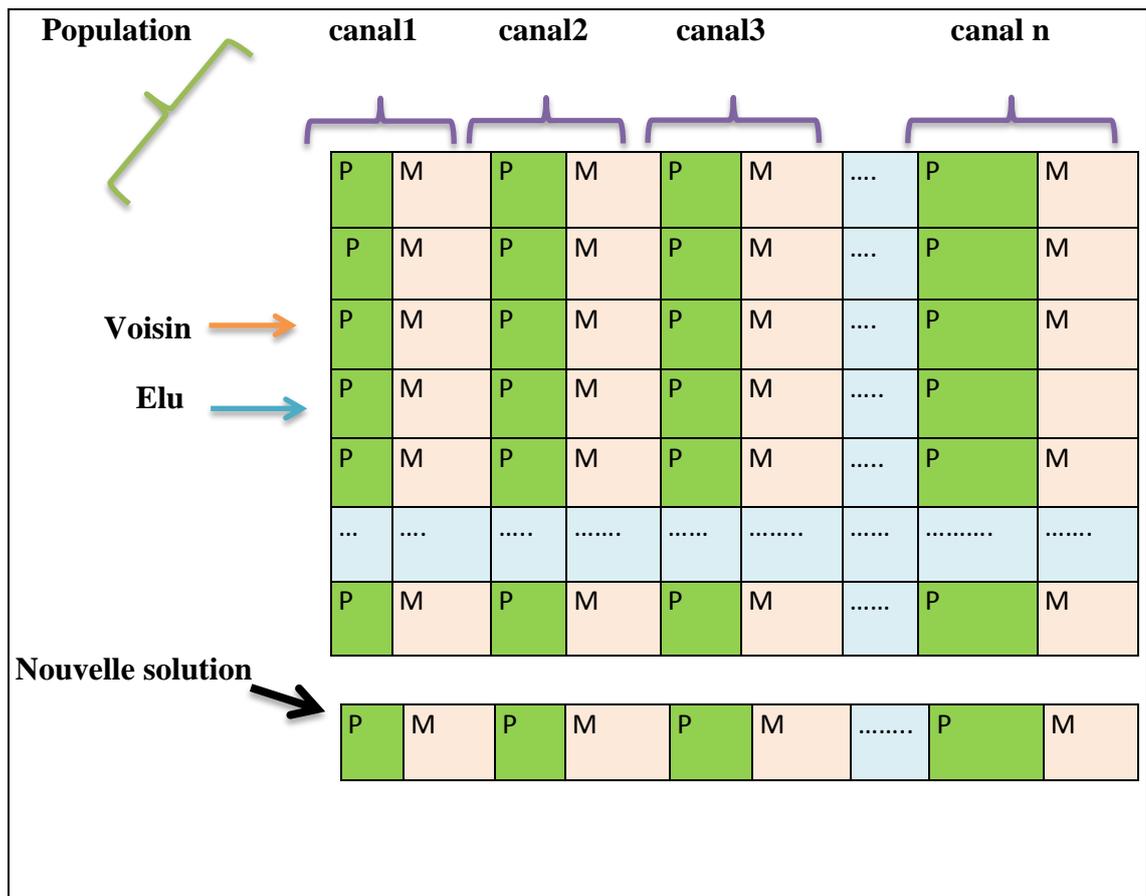
## 2. Génération de nouvelles solutions

Une fois la population de solutions est générée, l'algorithme calcule pour chaque vecteur (solution) sa fonction objectif et la stocke dans un tableau trié d'une façon

## Chapitre 3 Implémentation de l'application et évaluation des résultats

croissante. Ensuite, un nouvel individu sera créé en se basant sur 2 étapes intéressantes : la première étape appelée « sélection par le taux HMCR », si ce taux est faible donc il est fort possible que la valeur des paramètres du nouveau vecteur seront générées aléatoirement à partir de la plage des valeurs des paramètres autorisées, sinon si ce taux est trop grand (près de 1) alors un individu de cette population sera choisi d'une manière aléatoire **Elu** qui subit à l'opération de remplissage de ce nouveau individu.

La **Figure III.3** montre le principe de génération d'une nouvelle solution à partir de la mémoire d'harmonie.



**Figure III.3:** Le remplissage d'un nouvel individu

Le remplissage de la nouvelle solution est effectué comme suit:

- La puissance du nouveau vecteur sera égal à :

$$P(\text{nouveau } i) = P(\text{Elu } i) + \text{pourcentage} * P(\text{voisin } i).$$

Le Voisin est un nouvel individu différent à l'individu **Elu**, cet individu permet une meilleure diversification dans l'espace de solutions, le  $i$  présente l'index du canal, est qui varie de 1 à  $n$ .

- La modulation du nouveau vecteur sera égal à :

## **Chapitre 3** Implémentation de l'application et évaluation des résultats

---

$M(\text{nouveau } i) = M(\text{Elu } i) + \text{pourcentage} * M(\text{voisin } i)$ .

Après le remplissage du nouveau vecteur, il sera par la suite évalué par la fonction objective, selon le résultat de la fonction objectif il sera déterminé si cet individu sera inclus dans notre population ou non.

### **3. Modification de la population**

Si la nouvelle solution (le nouveau vecteur) créée est meilleure que la plus mauvaise solution dans la matrice HM en termes de valeur de fonction objectif alors le nouveau vecteur est inclus dans la HM et le plus mauvais individu existant est exclu du HM.

### **4. Vérification du critère d'arrêt**

Dans notre contribution, le critère d'arrêt présente un nombre de génération (improvisations) fixée au fur et à mesure de la simulation, tant que ce critère n'est pas atteint alors l'algorithme ne s'arrête pas.

## **VIII. Présentation de l'application**

L'application de cette algorithme a été menée sur un Acer avec un processeur Intel Core i3 1.80 GHz et 4 Go de RAM, fonctionnant sous Windows 7. Le prototype est développé avec Netbeans 7.0.1 et JDK 1.7.

Cette application est lancée à partir d'un bouton bleu « flèche » de notre interface d'accueil présenté dans la **Figure III.4**



Figure III.4 : Interface d'accueil

En cliquant sur le bouton bleu « flèche » qui se situe à la droite de notre interface, une autre interface de simulation s'affiche (voir la **Figure III.5**), presque toutes les configurations possibles peuvent se faire à partir de cette fenêtre.

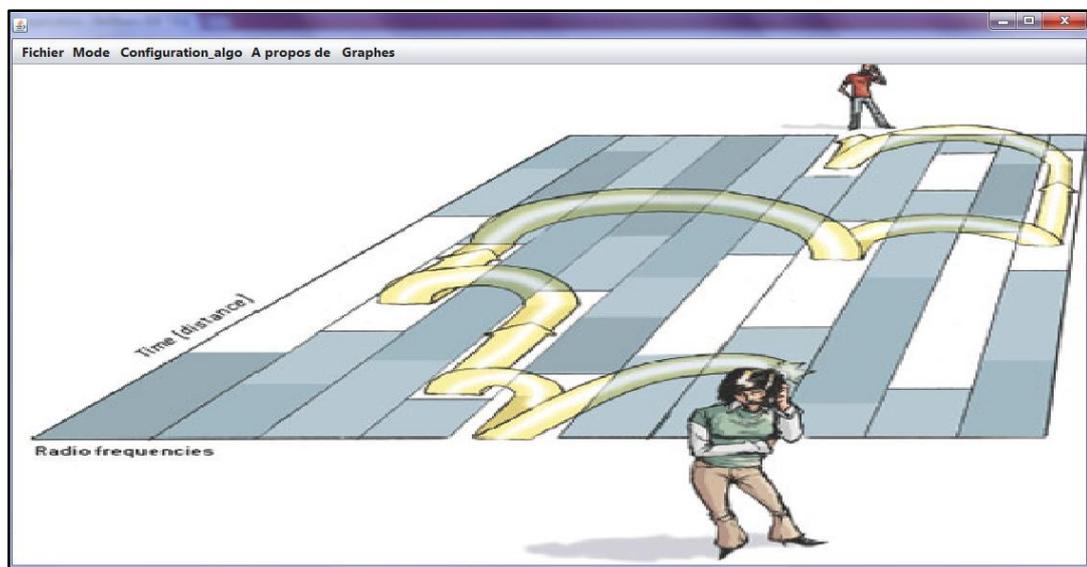
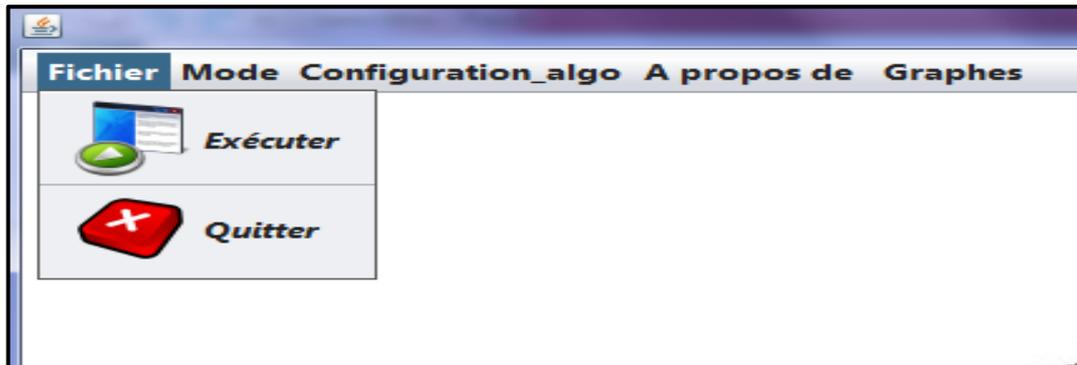


Figure III.5 : Fenêtre Principale

Le développement des interfaces a été réalisé à l'aide de la bibliothèque SWING. L'exécution de la simulation peut être lancée à partir du menu (Fichier → Exécuter)

comme il est montré dans la **Figure III.6**, et peut être ainsi arrêté à partir de (Fichier → Quitter).



**Figure III.6 :** Menu Fichier

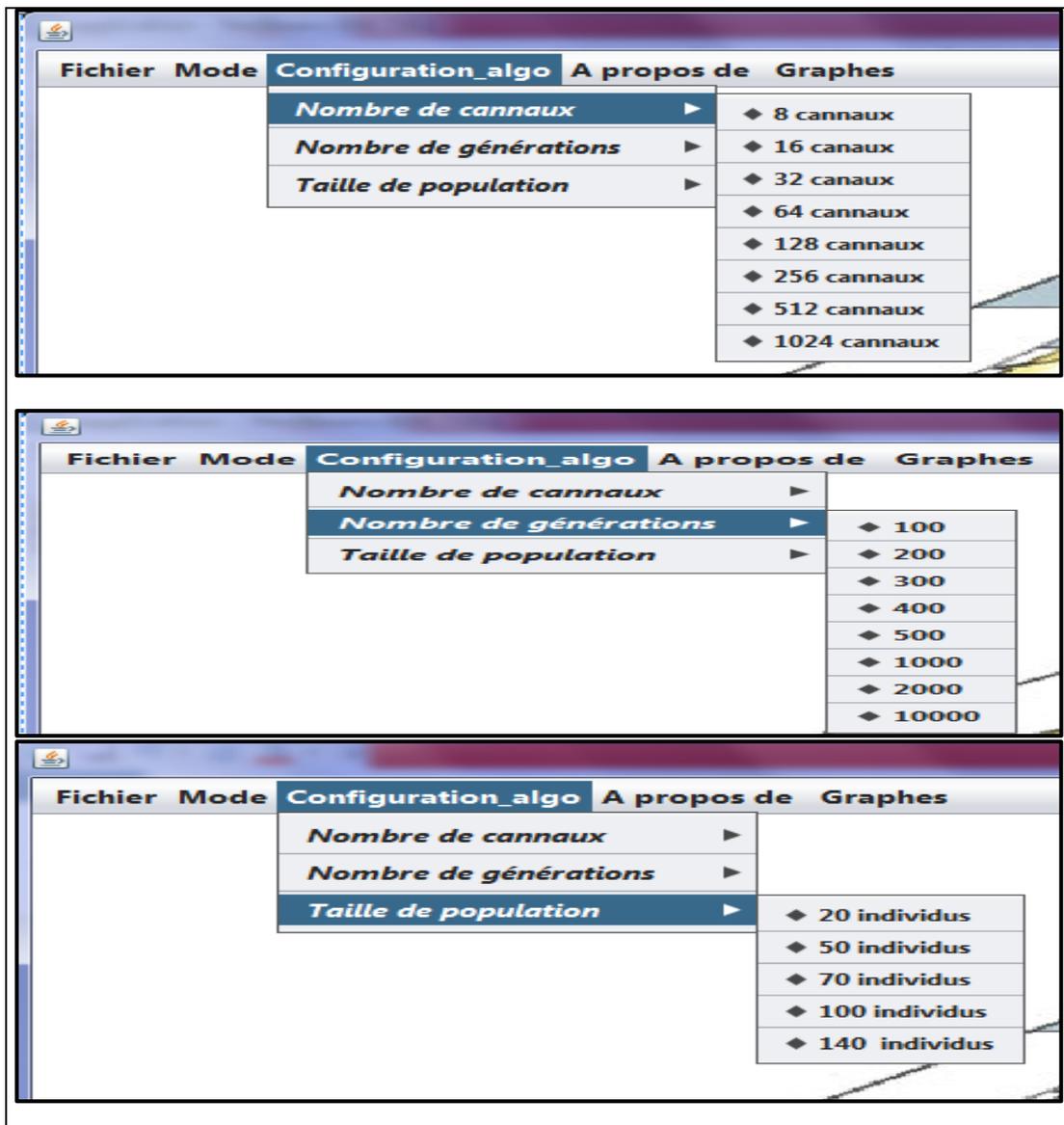
A partir du menu « Mode » présenté dans la **Figure III.7**, nous pouvons choisir un des trois modes de transmission « mode Urgence », « mode Multimédia », « mode Batterie faible » pour examiner la convergence de la fonction objective.



**Figure III.7 :** Menu Mode

L'algorithme d'harmonie doit passer par l'étape de configuration pour choisir les paramètres de simulation, notre application permet de configurer à partir du menu (Configuration-algo) les paramètres suivants (voir **Figure III.8**) :

- ❖ Le nombre d'individus.
- ❖ Le nombre de canaux par individu.
- ❖ Le nombre de génération.



**Figure III.8 :** Menu configuration-algorithme

Après chaque simulation, notre application permet de générer des graphes depuis le menu « graphe » à l'aide de la bibliothèque JFreeChart, ces histogrammes permettent de voir les caractéristiques de chaque canal d'une solution, que ce soit la puissance de transmission ou l'atténuation ou le nombre de bits envoyés par symbole comme il est montré dans la **Figure III.9** relative au mode multimédia. Les histogrammes permettent aussi d'examiner le comportement de l'algorithme : les meilleurs scores et le meilleur temps d'exécution pour chaque mode de transmission.

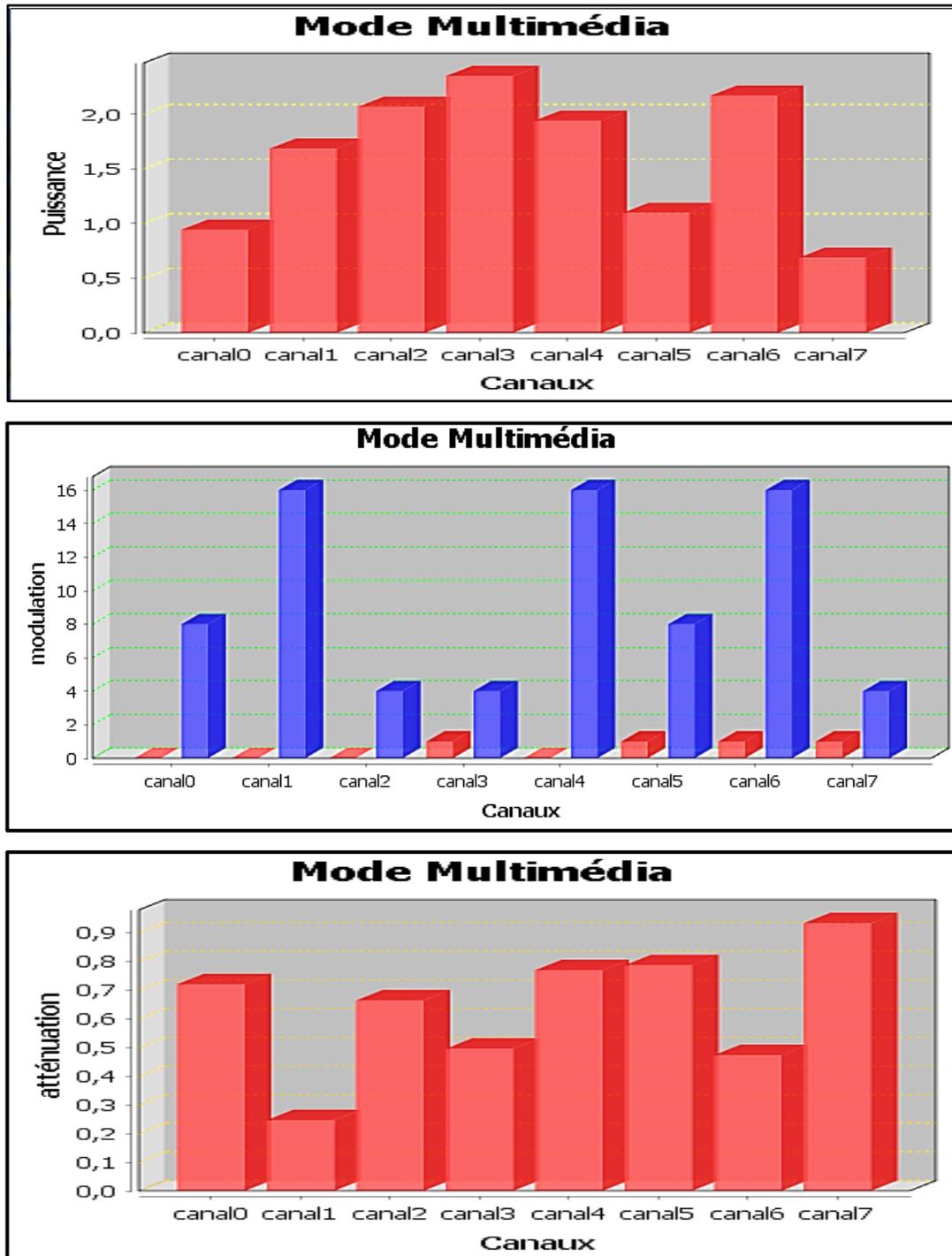


Figure III.9 : Caractéristiques d'un canal

### IX. Comportement de l'algorithme dans les différents modes

Tout d'abord nous allons déterminer les paramètres que nous avons utilisés lors de cette simulation pour étudier le comportement de l'algorithme dans chaque mode de transmission. Le **Tableau III.8** définit la valeur associée à chaque paramètre, nous avons choisi les valeurs HMCR et PAR tout en suivant l'étude [9].

Paramètre	Valeur
Taille de population	50
HMCR	0.80
PAR	0.30
Pourcentage	0.5
Nombre de canaux par individu	16
Génération	1500

**Tableau III.8 :** Paramètres de simulation

Puisque l'algorithme de l'harmonie est une méthode approchée non-déterministe alors les résultats ne sont pas exactes après qu'une simulation donc il est essentiel pour affirmer un résultat d'en faire plus qu'une fois. Pour chaque configuration, 10 simulations ont été exécutées et la moyenne de ces 10 exécutions est présentée ci-dessous.

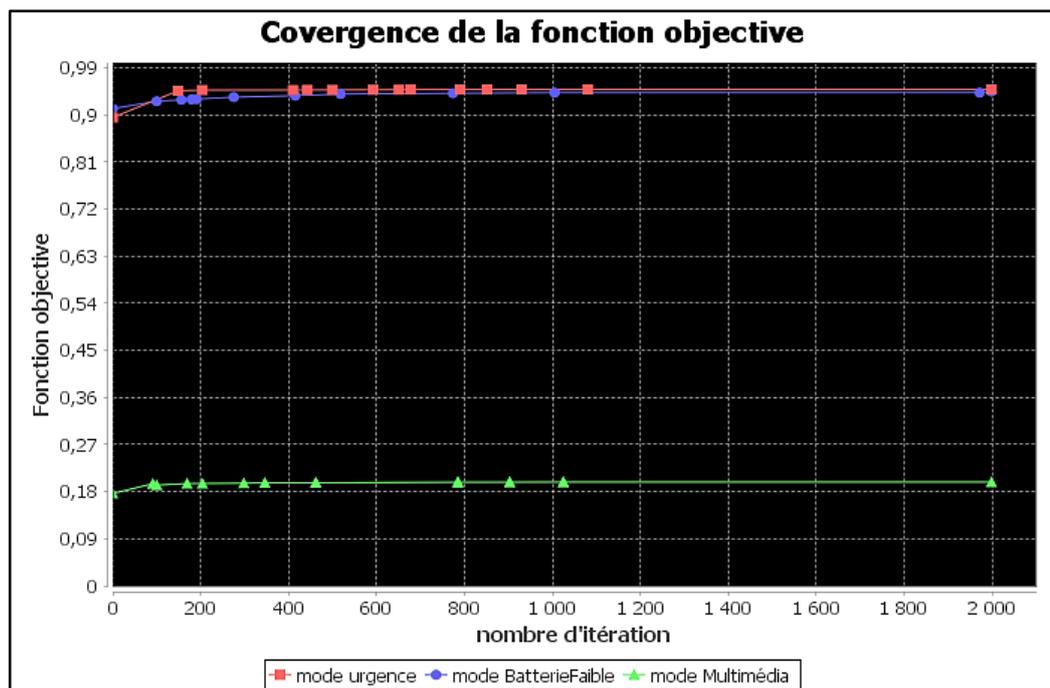
#### 1. Fonction Objectif

Nous avons exécuté l'algorithme RH pour chaque mode de transmission. Le **Tableau III.9** décrit les meilleures valeurs de la fonction objective dans la première et la dernière itération.

Mode de transmission	Meilleure score (Première génération)	Meilleure score (dernière génération)
Mode Urgence	0.8154	0.9491
Mode Batterie Faible	0.9123	0.9450
Mode Multimédia	0.1765	0.1990

**Tableau III.9 :** Meilleurs scores pour les trois modes de transmission

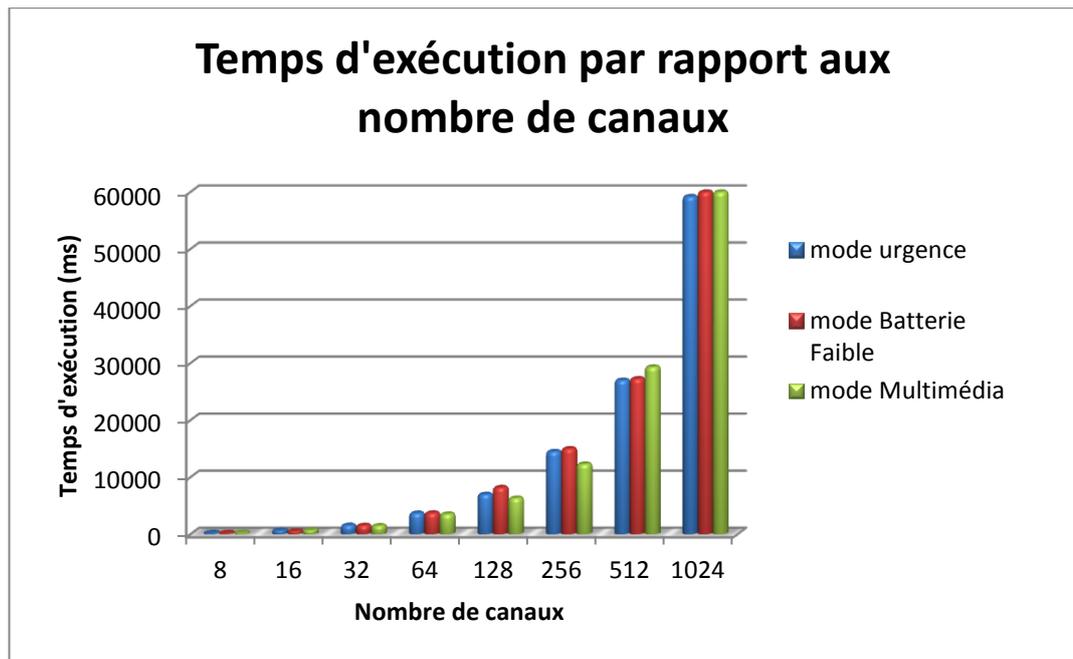
A travers les résultats obtenus, on peut constater bien que les valeurs de la fonction objectives augmentent d'une génération à une autre : on est passé de 0.8954 à 0.9589 pour le mode d'urgence, de 0.9123 à 0.9450 pour le mode Batterie Faible et de 0.1765 à 0.1990 pour le mode Multimédia. Nous pouvons conclure que l'algorithme a réussi d'améliorer considérablement les résultats de la fonction objective et par conséquent il a pu d'offrir une meilleure qualité de service aux utilisateurs.



**Figure III.10 :** Convergence de la fonction objective dans les différents modes de transmission

### 2. Temps de calcul

D'après les résultats des simulations nous avons remarqué que notre algorithme passe à un état de convergence (une stabilisation) après 1500 itérations pour les trois modes, c'est pour cette raison que nous avons calculé le temps d'exécution pour chaque mode de transmission et pour tous les canaux avec 1500 itérations et 50 individus. Les résultats sont montrés dans la **Figure III.9**.



**Figure III.11** : Temps d'exécution par rapport aux nombres de canaux

Puisque la radio cognitive est un système temps réel et d'après les résultats obtenus de notre algorithme il est préférable de réduire le nombre de canaux à 128 pour avoir un temps de réponse raisonnable sinon minimiser le nombre d'itérations dans le cas d'un nombre de canaux supérieur à 128.

## X. Recherche harmonie Vs Algorithme génétique en terme de fonction objective

Nous avons comparé nos résultats avec ceux obtenus avec les algorithmes génétiques [29] utilisés pour le même problème (codage réel).

Les différents résultats présentés dans le **Tableau III.10** représentent la moyenne des valeurs obtenus après plusieurs simulations. Pour qu'elles soient cohérentes, nous avons utilisé la même taille de population qui est égal à 50, le même nombre de génération 10000 pour les deux algorithmes tout en changeant le nombre de canaux disponibles.

Nombre de canaux	Mode de transmission					
	Urgence		Multimédia		Batterie Faible	
	AGs	HS	AGs	HS	AGs	HS
8	0.8198	0.9485	0.9701	0.1986	0.8955	0.9428
16	0.7983	0.9488	0.9749	0.1985	0.8936	0.9444
32	0.7926	0.9486	0.9701	0.1985	0.8996	0.9440
64	0.7983	0.9489	0.9695	0.1990	0.8945	0.9448
128	0.7853	0.9491	0.9690	0.1993	0.8962	0.9465
256	0.7823	0.9495	0.9668	0.1996	0.8948	0.9477

**Tableau III.10:** Meilleurs scores obtenus après 10000 générations

D'après les résultats mentionnés dans le tableau ci-dessus, nous pouvons remarquer que notre algorithme a réussi de garantir une meilleure solution (meilleure qualité de service) pour les deux modes Batterie Faible et Urgence comparé aux AGs. Toutefois les AGs restent meilleur par rapport aux temps d'exécution.

## **XI. Conclusion**

L'algorithme de la recherche par harmonie a prouvé son utilité dans le domaine de l'optimisation de la qualité de service dans les réseaux de radio cognitive, en effet nous avons remarqué d'après les résultats obtenus qu'il a réussi de trouver les meilleurs solutions pour les trois modes peu importe le nombre de canaux.

En termes de temps de calcul nous avons remarqué que son utilisation doit être limitée à certain nombre de porteuses pour être utilisé dans un contexte temps réel.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

---

L'étude présentée dans ce modeste travail est consacrée à l'optimisation de la qualité de service dans les réseaux de radio cognitive en utilisant l'algorithme de la recherche par harmonie.

Dans ce mémoire, et pendant le premier chapitre nous avons présenté une introduction à la radio cognitive, ses caractéristiques, ses composants et fonctionnalités ainsi que ses domaines d'application.

Dans le deuxième chapitre nous avons pu définir la notion de métaheuristique et ses caractéristiques pour la résolution des problèmes d'optimisation qui consiste à minimiser ou à maximiser une fonction donnée tout en explorant un espace de solutions fini. En effet l'algorithme de la recherche par harmonie présente une des métaheuristicues qui a prouvée récemment son utilité dans plusieurs domaines grâce à sa robustesse et sa facilité. Cependant elle présente certaines limites qui influent fortement sur la convergence de l'algorithme tel que le choix des bons paramètres à savoir la taille de la population, le nombre de génération, la probabilité de sélection et de modification. Le paramétrage de tous ses paramètres est l'un des objectifs visés par les chercheurs dans ce domaine.

L'implémentation de l'application est présentée dans le troisième chapitre durant lequel nous avons évalué les performances de notre algorithme en se basant sur des résultats après plusieurs simulations, ces dernières confirment l'efficacité de notre algorithme en termes de fonction objective pour les trois modes de transmission et avec un gain moyen en termes de temps d'exécution. Nous avons comparé aussi notre algorithme avec les algorithmes génétiques et nous avons montré son efficacité en termes de fonction objective.

En perspective, il serait intéressant de varier les valeurs des paramètres pour voir leur impact sur la qualité de service et ainsi paramétrer mieux l'algorithme. Nous proposons aussi de traiter l'impact de l'accroissement du nombre de sous porteuse sur le temps d'exécution global de l'algorithme. La mobilité de l'utilisateur secondaire serait aussi intéressante à la considérer dans les perspectives afin de voir son impact sur la qualité de service fournie par notre algorithme. L'extension de cette problématique à d'autres métaheuristicues est aussi à prendre en considération dans nos futurs travaux.

# Références Bibliographiques

---

- [1] A. Berkani, « Métaheuristique Hybride Réseaux de Neurones Artificiels-PSO du Recuit Simulé pour la Commande d'un Procédé Industriel Non-linéaire », Thèse de Magistère en Electronique, Université De Batna, 2013. Disponible sur le site d'université de hadj Lakhdar de Batna : <http://theses.univ-batna.dz/acueil/Faculté de Technologie/Département d'Electronique/Magister/2013>. Consulté le 06.06.2015.
- [2] A. Chehata, « Algorithmes de Routage dans les réseaux sans-fil de Radios Cognitives à multi-sauts », Thèse de maitrise en Informatique, Université du Québec à Montréal, Avril 2011. Disponible sur le site <http://www.archipel.uqam.ca/4095/1/M12044.pdf>. Consulté le 06.06.2015.
- [3] A. Fetanat, G. Shafipour, F. Ghanatir, "Reliability Redundancy optimization for optimal Designing in Gas Turbines' Overspeed protection using Elitism Box-Muller Harmony Search Algorithm", Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 46 No.2, Decembre 2012, ISSN: 1992-8645(Print), ISSN: 1817-3195(Online). Disponible sur le site: [www.jatiti.org/volumes/vol46No2/72Vol46No2.pdf](http://www.jatiti.org/volumes/vol46No2/72Vol46No2.pdf). Consulté le 06.06.2015.
- [4] A. Gherboudj, « Méthodes de résolution de problèmes difficiles académiques », Thèse de Doctorat, Université de Canstantine 2, 2013.
- [5] B. Autin, « Les Métaheuristiques en optimisation Combinatoire », Mémoire pour l'obtention l'examen probatoire en informatique, Conservatoire Nationales des Arts et des Métiers Paris, Mai 2006.
- [6] B. Benmammar, « Intelligence artificielle et radio cognitive », cours en ligne disponible à : <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00680196v1/document>, Mars 2012.
- [7] B. Benmammar, A. Amraoui, « Allocation des ressources radio et accès dynamique au spectre », Rapport de recherche, Laboratoire de télécommunication, Université de Abou Bakr Belkaid Tlemcen -Algérie-, 2014. Disponible sur le site : <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1407/1407.2705.pdf>. Consulté le 06.06.2015.
- [8] B. R .Kouassi, « Stratégies de Coopération dans les Réseaux Radio Cognitif », Thèse de doctorat, laboratoire d'Informatique, Université Nice Sophia Antipolis, octobre 2013.

- [9] F. Hadjila, M. A. Chikh, M. Merzoug, "QoS-Aware Web Service Selection Based On Harmony Search", Concepts et Outils pour le Management de la Connaissance (KM) : 4ème Colloque International ISKO-Maghreb, Alger, Algérie, 9-10 Novembre 2014. ISBN: 978-1-4799-7509-9.
- [10] F. Z. Benayed, M. Rahli, L. AbdelHakem-Koridak, "Optimisation du dispatching Economique par l'algorithme Harmony Search", première Conférence internationale de l'ingénierie électrique14, Biskra, Algérie, Decembre 2014.
- [11] <http://www.thedailyomnivore.net>. Consulté le 06-06-2015.
- [12] I. Larbi, B. Benmammam, « Négociation de spectre dans les réseaux de radio cognitive », Rapport de recherche, Université de Abou Bakr Belkaid Tlemcen, Juin 2013. Disponible sur le site : <https://hal.inria.fr/hal-00847971/document>. Consulté le 06-06-2015.
- [13] I. Ngom, L. Diouf, « La radio Cognitive », Master Professionnel Télécommunications, Université Lille 1 USTL, France, 2008
- [14] J. Mitola, G. Q. Maguire Jr, "Cognitive radio: making software radios more personal", Personal Communications, IEEE, vol. 6, No 4, 13, 18.
- [15] L. Ali, « Introduction aux Métaheuristiques », support de cours, Université de Jijel, 2014.
- [16] M. Sandeli, « Traitement d'images par des approches bio-inspirées Application à la segmentation d'images », thèse de Magister, Université Constantine 2, Février 2014.
- [17] M. S. Bendella, « Gestion de spectre dans les réseaux de radio cognitive par la formation de coalitions », mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, Juin 2014.
- [18] N. A. Saoucha, « Paramétrage des algorithmes génétiques pour l'optimisation de la QoS dans les réseaux radios cognitifs », Thèse de Magister, Université de M'sila, Mars 2013.
- [19] O. M. Alia, R. Mandava, "The variants of the harmony search algorithm: an overview ", Journal of Artificial Intelligence Review. Vol.35, No.1, Juin 2013, PP: 49-
- [20] P. Luangpaiboon, « Noisy response surface optimizations via harmony search algorithm and its hybridizations", Journal of Applied Operational Research, Vol. 3, No. 1, 2011, pp: 46–57. ISSN 1735-8523(online).

- [21] S. A. Ratsirarson, T. Rakotonirina, N.M.V Ravonimantsoa, « Analyse des différents types des fonctions de La radio cognitive », Rapport de recherche, Université d'Antananarivo, Madagascar. Disponible sur le site <http://madarevues.recherches.gov.mg/IMG/pdf/>. Consulté le 06-06-2015.
- [22] S. Aupetit, M. Slimane, « Métaheuristiques pour l'optimisation difficile », Laboratoire Informatique, Université François Rabelais Tours, France, 8 Aout 2013. Disponible sur le site : <https://library.projectsforge.org/file/504/download?token=GWMqZbjZ>. Consulté le 06-06-2015.
- [23] S. Digabel, « Introduction aux Métaheuristiques », support de cours, Ecole Polytechnique de Montréal, France.
- [24] S. Haykin, «Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications», Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 23, pp. 201, 2005.
- [25] S. Labeled, « Méthodes bio-inspirées hybrides pour la résolution de problèmes Complexes », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Avril 2013. Disponible sur le site : [www.univ-constantine2.dz/files/Theses/Informatique/](http://www.univ-constantine2.dz/files/Theses/Informatique/). Consulté le 06-06-2015.
- [26] S. M. Douiri, S. Elberoussi, H. Lakhbab, « Cours des Méthodes de Résolution Exactes Heuristiques et Métaheuristiques », article, Université Mohammed V, Rabat, Maroc, Avril 2013. Disponible sur le site : <http://www.fsr.ac.ma/cours/maths/beroussi/Cours%20C2SI.pdf>. Consulté le 06-06-2015.
- [27] T.D. Nguyen, « Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Octobre 2012.
- [28] 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, Novembre 2007.
- [29] Y. Hssaine, « Optimisation de la QOS dans un réseau de radio cognitive en utilisant les algorithmes génétiques », mémoire de Master, Université de Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Juin 2014.

# Liste des figures

<b>FIGURE I.1</b> : REPARTITION DU SPECTRE RADIO FREQUENCE EN FONCTION DES TECHNOLOGIES [8] .....	9
<b>FIGURE I.2</b> : L'EVOLUTION DE LA RADIO MATERIELLE A LA RADIO LOGICIELLE [17].....	10
<b>FIGURE I.3</b> : ETAPES DE DEVELOPPEMENT DE LA RADIO COGNITIVE [17].....	12
<b>FIGURE I.4</b> : EXEMPLE D'EXPLOITATION LES BANDES LIBRES PAR LE SU [8].....	13
<b>FIGURE I.5</b> : ARCHITECTURE DE LA RADIO COGNITIVE [12] .....	14
<b>FIGURE I.6</b> : LA CAPACITE COGNITIVE [17].....	14
<b>FIGURE I.7</b> : LES TROUS DU SPECTRE [11].....	15
<b>FIGURE I.8</b> : RC, WBAN, CAPTEURS [6].....	17
<b>FIGURE II.1</b> : CLASSIFICATION DES METHODES DE RESOLUTION DE PROBLEMES D'OPTIMISATION [4] .....	23
<b>FIGURE II.2</b> : PASSAGE D'UN PHENOMENE NATUREL A UN ALGORITHME INSPIRE DE LA NATURE [16].....	25
<b>FIGURE II.3</b> : STRUCTURE DE LA MEMOIRE D'HARMONIE .....	27
<b>FIGURE II.4</b> : LE REMPLACEMENT DE LA MAUVAISE PAR LA BONNE HARMONIE DANS HM [22] .....	28
<b>FIGURE II.5</b> : ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME HS [20] .....	30
<b>FIGURE II.6</b> : L'ANALOGIE ENTRE LA MUSIQUE D'IMPROVISATION ET L'OPTIMISATION [19] .....	31
<b>FIGURE III.1</b> : STRUCTURE D'UN INDIVIDU.....	41
<b>FIGURE III.2</b> : STRUCTURE DE LA POPULATION DE SOLUTION.....	41
<b>FIGURE III.3</b> : LE REMPLISSAGE D'UNE NOUVELLE SOLUTION .....	42
<b>FIGURE III.4</b> : INTERFACE D'ACCUEIL .....	44
<b>FIGURE III.5</b> : FENETRE PRINCIPALE .....	44
<b>FIGURE III.6</b> : MENU FICHIER .....	45
<b>FIGURE III.7</b> : MENU MODE .....	45
<b>FIGURE III.8</b> : MENU CONFIGURATION-ALGORITHME .....	46
<b>FIGURE III.9</b> : CARACTERISTIQUES D'UN CANAL .....	47
<b>FIGURE III.10</b> : CONVERGENCE DE LA FONCTION OBJECTIVE DANS LES DIFFERENTS MODES DE TRANSMISSION .....	49
<b>FIGURE III.11</b> : TEMPS D'EXECUTION PAR RAPPORT AUX NOMBRES DE CANAUX.....	50

# Liste des tableaux

<b>TABLEAU III.1:</b> FORMULATION MATHÉMATIQUE DES TROIS CRITÈRES [28].....	35
<b>TABLEAU III.2:</b> DÉFINITION DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES [28].....	35
<b>TABLEAU III.3 :</b> LA VALEUR DE TAUX D'ERREUR SELON LES TYPES DE MODULATION [28] .....	36
<b>TABLEAU III.4:</b> RELATION ENTRE LES FONCTIONS ET LES PARAMÈTRES.....	37
<b>TABLEAU III.5:</b> ASSOCIATION DES POIDS AUX DIFFÉRENTS MODES DE TRANSMISSION [29].....	39
<b>TABLEAU III.6:</b> CODAGE DE LA PUISSANCE .....	40
<b>TABLEAU III.7:</b> CODAGE DE LA MODULATION .....	40
<b>TABLEAU III.8 :</b> PARAMÈTRES DE SIMULATION .....	48
<b>TABLEAU III.9 :</b> MEILLEURS SCORES POUR LES TROIS MODES DE TRANSMISSION .....	49
<b>TABLEAU III.10:</b> MEILLEURS SCORES OBTENUS APRÈS 10000 GÉNÉRATIONS .....	51

# Glossaire

<b>Acronyme</b>	<b>Signification</b>
<b>RC</b>	<b>Radio Cognitive</b>
<b>FCC</b>	<b>Federal Communications Commission</b>
<b>QoS</b>	<b>Qualité of Service</b>
<b>RF</b>	<b>Radio Frequency</b>
<b>AG</b>	<b>Algorithme Génétique</b>
<b>UIT</b>	<b>Union Internationale des Télécommunications</b>
<b>CMR</b>	<b>Conférences Mondiales des Radiocommunications</b>
<b>AGS</b>	<b>Autorité compétente de Gestion du Spectre</b>
<b>CRTS</b>	<b>Canadian Radio-television and Telecommunications Commission</b>
<b>ARCEP</b>	<b>Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes</b>
<b>SPTF</b>	<b>Spectrum Policy Task Force</b>
<b>SDR</b>	<b>Software Defined Radio</b>
<b>PU</b>	<b>Primary User</b>
<b>SU</b>	<b>Secondary User</b>
<b>VNS</b>	<b>Variable Neighbourhood Search</b>
<b>KTH</b>	<b>Royal Institute of Technology</b>
<b>RH</b>	<b>Recherche par Harmonie</b>
<b>HM</b>	<b>Harmony Memory</b>
<b>HMS</b>	<b>Harmony Memory Size</b>
<b>HMCR</b>	<b>Harmony Memory Considering Rate</b>
<b>PAR</b>	<b>Pitch Adjusting Rate</b>
<b>NI</b>	<b>Nombre d'Improvisation</b>
<b>PSK</b>	<b>Phase Shift Keying</b>
<b>QAM</b>	<b>Quadrature Amplitude Modulation</b>

# Résumé

---

La Radio Cognitive a été apparue comme étant une solution prometteuse qui tente à régler les inconvénients du problème de l'encombrement et l'insuffisance spectrale tout en partageant le spectre entre un utilisateur opportuniste dit secondaire et un utilisateur propriétaire appelé primaire. Dans notre mémoire, nous nous sommes intéressés à l'optimisation de la qualité de service dans le domaine de la radio cognitive, et dans un contexte multicanaux en utilisant une méta-heuristique appelée « recherche par harmonie ». Les résultats ont montré que l'utilisation de cet algorithme peut améliorer significativement la qualité de service de l'utilisateur, mais il doit être limité à un certain nombre de sous porteuses pour être utilisé dans un contexte temps réel.

**MOT CLES :** Radio cognitive, optimisation mono-objective, recherche par harmonie, QoS.

## Abstract

---

Cognitive radio has been emerged as a promising solution, trying to solve the disadvantages of congestion and spectral failure, it is based on the sharing of the spectrum between an opportunistic user called secondary and an owner user named primary. In the context of our project, we are interested in optimizing the quality of service in cognitive radio networks, and a multi-channel environment using a metaheuristic called "Harmony Search". The results showed that the use of this algorithm can significantly improve the quality of service of the user, but its use should be limited to a number of subcarriers (channels) in order to be used in a real time context.

**KEYWORDS:** Cognitive radio, mono-objective optimization, Harmony Search, QoS.

## ملخص

---

ظهرت الأنظمة الراديوية الإدراكية كحل واعدة، تحاول حل مساوئ مشكلة الازدحام و الندرة التي يواجهها الطيف الراديوي، حيث يركز مبدأ هاته الأنظمة على تقاسم الطيف الراديوي بين المستخدم الأولي و المستخدم الثانوي. في سياق هذه المذكرة نحن مهتمون بتحسين جودة الخدمة في الشبكات الراديوية الإدراكية في اطار متعدد القنوات باستخدام خوارزمية " البحث عن قطعة موسيقية مثلى" و قد أظهرت النتائج أن استخدام هذه الخوارزمية يمكن أن يحسن بشكل ملحوظ نوعية و جودة الخدمة للمستخدم، ولكن استخدامه ينبغي أن يقتصر على عدد من الحوامل الجزئية (قنوات) لاستخدامها في سياق الوقت الحقيقي

**الكلمات المفتاحية :** الراديو الإدراكية، التحسين الواحد الهدف، البحث عن قطعة موسيقية مثلى، جودة الخدمة