



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen  
Faculté des Sciences  
Département d'Informatique

Thèse

pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Informatique

Option: Intelligence Artificielle et Ingénierie des Connaissances

*Thème*

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

**Réalisée par :**

- AMRAOUI Asma

*Thèse soutenue devant le jury*

<i>BENDIMERAD Fethi Tarik</i>	<i>Professeur</i>	<i>Université de Tlemcen</i>	<i>(Président)</i>
<i>BENMAMMAR Badr</i>	<i>MCA</i>	<i>Université de Tlemcen</i>	<i>(Directeur de thèse)</i>
<i>BOUKLI HACENE Sofiane</i>	<i>MCA</i>	<i>Université de Sidi Bel Abbès</i>	<i>(Examineur)</i>
<i>FARAOUN Kamel Mohamed</i>	<i>Professeur</i>	<i>Université de Sidi Bel Abbès</i>	<i>(Examineur)</i>
<i>LEHSAINI Mohamed</i>	<i>MCA</i>	<i>Université de Tlemcen</i>	<i>(Examineur)</i>
<i>KADRI Benamar</i>	<i>MCA</i>	<i>Université de Tlemcen</i>	<i>(Examineur)</i>

Année universitaire : 2014 – 2015

## ***Remerciements***

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse Badr BENMAMMAR pour son esprit scientifique et sa pédagogie, pour m'avoir prêté de son temps le plus précieux et m'avoir aidé par ses précieuses directives.*

*Je remercie Mr BENDIMERAD d'avoir accepté de présider le jury, je remercie également Mr BOUKLI HACENE, Mr FARAOUN, Mr LEHSAINI et Mr KADRI pour avoir accepté de nous prêter leur attention et évaluer notre travail.*

*Sans oublier le département d'Informatique de la faculté des sciences et le laboratoire de télécommunications de Tlemcen LTT qui m'ont accueillie au sein de leur établissement.*

*Mes remerciements les plus sincères vont à toutes les personnes qui m'ont apporté leur contribution, leur collaboration et leur soutien et qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de cette thèse.*

*"La réussite est liée à la patience mais elle dépend  
également de beaucoup de bonne volonté"*

***Gilbet Brévar***

*A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un  
magnifique modèle de labeur et de persévérance,*

*A mon cher mari pour son soutien moral et sa patience avec moi,*

*A mes chères sœurs à qui je souhaite un avenir très brillant,*

*A ma famille et à tous mes amis,*

*Je dédie ce travail*

***Asma***

# GLOSSAIRE

**ABC** Always Best Connected

**ACL** Access Control List

**AEIO** Agent Environnement Interactions Organisation

**AG** Algorithmes Génétiques

**AHP** Analytic Hierarchy Process

**ARCEP** Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes

**BDI** Belief, Desire, Intention

**BF** Bande de fréquence

**BS** Base Station

**CORBA** Common Object Request Broker Architecture

**CPU** Coalition Primary User

**CRAHNS** Cognitive Radio Ad Hoc Networks

**CRMT** Cognitive Radio Mobile Terminal

**CSU** Coalition Secondary User

**CTMC** Continuous-Time Markov Chain

**ELECTRE** ELimination Et Choix Traduisant la REalité

**EN** Equilibre de Nash

**FCC** Federal Communications Commission

**FIFO** First In First Out

**FIPA** Foundation for Intelligent Physical Agents

**FORTRAN** FORMula TRANslator

**HMM** Hidden Markov Model

**IA** Intelligence Artificielle

**IAD** Intelligence Artificielle Distribuée

**IDL** Interactive Data Language

**ISM** Industrie, Science et Médical

**JADE** Java Agent DEvelopment Framework

**JAVA** Langage de programmation informatique orienté objet

**KIF** Knowledge Interchange Format

**KTH** Institut royal de technologie

**KQML** Knowledge Query and Manipulation Language

**LAN** Local Area Network

**LTM** Long Term Memory

**MAN** Metropolitan Area Network

**OBR** Ontology Based Radio

**OODA** Observe, Orient, Decide and Act

**P2MP** Point to MultiPoint

**PDA** Personal Digital Assistant

**PU** Primary User

**PUBS** Primary User Base Station

**QoI** Quality of Information

**QoS** Quality of Service

**RC** Radio Cognitive

**RF** Radio Frequency

**RKRL** Radio Knowledge Representation *Language*

**SDR** Software Defined Radio

**SINR** Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio

**SMA** Système Multi-agents

**SNR** Signal Noise Ratio

**SSC** Shared Spectrum Company

**STM** Short Term Memory

**SU** Secondary User

**SUBS** Secondary User Base Station

**TOPSIS** Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

**UHF** Ultra High Frequency

**UIT** Union Internationale des Télécommunications

**UML** Unified Modeling Language

**VHF** Very High Frequency

**WIFI** Wireless Fidelity

**WIMAX** Worldwide Interoperability for Microwave Access

**WLAN** Wireless Local Area Network

**WRAN** Wireless Regional Area Network

# Table des matières

Introduction générale.....	1
I. CHAPITRE I: Récapitulatif sur les réseaux de radio cognitive .....	5
I.1 Introduction .....	5
I.2 Réseaux sans fil et mobiles.....	6
I.2.1 Réseaux sans fil.....	6
I.2.2 Réseaux mobiles.....	6
I.3 Norme IEEE 802.22 .....	6
I.4 Règlementation.....	7
I.5 Radio logicielle (software radio) .....	8
I.5.1 Radio logicielle restreinte (SDR) .....	8
I.5.2 De l'idée de radio logicielle à la radio cognitive .....	8
I.6 Réseaux de radio cognitive.....	10
I.6.1 Historique .....	10
I.6.2 Définitions .....	10
I.6.3 Principe.....	11
a Utilisateurs primaires .....	11
b Utilisateurs secondaires .....	11
I.6.4 Architecture de la radio cognitive .....	12
I.6.5 Cycle de cognition.....	14
a Phase d'observation (détecter et percevoir).....	15
b Phase d'orientation .....	15
c Phase de planification .....	15
d Phase de décision .....	16
e Phase d'action.....	16
f Phase d'apprentissage.....	16
I.6.6 Composantes de la radio cognitive.....	16
I.6.7 Fonctions de la radio cognitive .....	18
a Détection du spectre (Spectrum sensing).....	18
b Gestion du spectre (Spectrum management) .....	18
c Mobilité du spectre (Spectrum mobility).....	20
I.6.8 Domaines d'application de la radio cognitive .....	20

I.6.9	Langages de la radio cognitive.....	21
I.7	Intelligence artificielle et radio cognitive.....	23
I.7.1	Algorithmes intelligents.....	24
I.7.2	Réseaux de neurones.....	24
I.7.3	Algorithmes génétiques.....	25
I.7.4	Chaînes de Markov.....	25
I.8	Conclusion.....	27
II.	CHAPITRE II: Synthèse sur les systèmes multi-agents.....	29
II.1	Introduction.....	29
II.2	Systèmes multi-agents.....	29
II.2.1	Quand et Pourquoi opter pour les SMA.....	30
II.3	Agent.....	31
II.3.1	Caractéristiques des agents.....	31
II.3.2	Typologie des agents.....	32
a	Agents réactifs.....	32
b	Agents cognitifs.....	32
c	Agents hybrides.....	33
II.3.3	Architecture des agents.....	33
a	Architecture réactive.....	33
b	Architecture cognitive.....	34
c	Architecture hybride.....	35
II.4	Environnement.....	37
II.4.1	Propriétés de l'environnement.....	38
II.5	Interactions entre agents.....	39
II.5.1	Coopération entre agents.....	40
II.5.2	Coordination entre agents.....	40
II.5.3	Négociation entre agents.....	41
II.5.4	Communication entre agents.....	41
a	Protocole d'interaction entre agents.....	42
b	Transport de messages.....	42
c	Langages de communication entre agents.....	42
II.6	Organisation des agents.....	43
II.7	Techniques de négociation.....	44

II.7.1	Contract Net .....	44
II.7.2	Négociation heuristique.....	45
II.7.3	Négociation par argumentation .....	45
II.7.4	Théorie des jeux .....	45
a	Théorie des jeux dans la RC .....	47
II.7.5	Théorie des enchères .....	47
a	Utilisation des enchères dans la RC.....	48
II.7.6	Décision multicritère .....	51
b	Décision multicritères et RC.....	55
II.8	Etat de l'art sur l'utilisation des SMA dans la RC.....	55
II.9	Conclusion.....	59
III.	CHAPITRE III: Architecture proposée et contributions .....	61
III.1	Introduction .....	61
III.2	Application des SMA dans la RC.....	61
III.2.1	Agents.....	61
III.2.2	Environnement .....	62
III.2.3	Interactions .....	62
III.2.4	Organisation .....	63
III.3	Architecture multi-agents dans le contexte de la radio cognitive.....	63
III.3.1	Niveau physique .....	64
III.3.2	Niveau cognitif.....	65
III.3.3	Niveau comportemental .....	67
III.4	Comportement basé sur la théorie des enchères .....	67
III.4.1	Topologie utilisée.....	68
III.4.2	Enchères à enveloppes scellées au premier prix .....	69
III.4.3	Enchères anglaises.....	71
III.4.4	FIFO'.....	72
III.5	Comportement basé sur les méthodes multicritères .....	74
III.5.1	Utilisation des CPU .....	74
a	Topologie du réseau utilisé .....	75
III.5.2	Utilisation des CPU et CSU .....	78
a	Scénario.....	82
b	Exemple illustratif.....	82

III.6 Conclusion .....	83
IV. CHAPITRE IV: Expérimentations et résultats .....	85
IV.1 Introduction .....	85
IV.2 Expérimentations .....	85
IV.3 Schéma n° 1 « un à plusieurs »: un PU à plusieurs SU .....	86
IV.3.1 Simulation des enchères à enveloppes scellées avec programmation dynamique.....	87
a Enchères à enveloppes scellées au premier prix .....	87
b Enchères anglaises .....	88
c Comparaison entre les deux types d'enchères .....	89
d Discussion .....	92
IV.3.2 Simulation des enchères à enveloppes scellées avec algorithme glouton.....	92
IV.3.3 Simulation FIFO' .....	93
IV.3.4 Etude comparative.....	94
a Comparaison en termes d'efficacité .....	94
b Comparaison en termes de gain de PU .....	95
c Comparaison en termes de temps requis.....	95
d Comparaison en termes de temps de réponse coté SU.....	96
IV.4 Schéma n° 2 « plusieurs à un »: plusieurs PU à un SU .....	97
IV.4.1 Négociation basée sur la théorie des enchères .....	97
IV.4.2 Négociation basée sur les méthodes multicritères.....	100
IV.4.3 Etude comparative.....	101
IV.5 Schéma n° 3 « plusieurs à plusieurs »: plusieurs PU à plusieurs SU .....	105
IV.5.1 Etude comparative.....	105
IV.6 Conclusion .....	107
Conclusion générale .....	108
Références bibliographiques .....	110
Liste de publications.....	118
Annexe A.....	120
Annexe B.....	123

## Liste des figures

Figure 1: Architecture de la radio cognitive.....	9
Figure 2: Le concept des trous du spectre [11] .....	12
Figure 3: Architecture de la radio cognitive.....	12
Figure 4: Protocoles utilisés par la radio cognitive .....	14
Figure 6: Cycle de cognition de Mitola.....	16
Figure 5: Cycle de cognition simplifié.....	16
Figure 7: Composantes de la radio cognitive .....	17
Figure 8: Accès au spectre coopératif et non-coopératif [20] .....	19
Figure 9: Expression d'un plan en KQML .....	22
Figure 10: Réseau de neurones pour la modélisation des performances de l'IEEE 802.11 .....	25
Figure 11: Architecture réactive de subsomption .....	34
Figure 12: Architecture BDI d'un agent .....	35
Figure 13: Architecture InteRRaP .....	37
Figure 14: Différentes étapes de l'algorithme TOPSIS .....	52
Figure 15: Arbre binaire modélisant les interactions entre agents dans le cas de la RC.....	63
Figure 16: Architecture globale proposée .....	64
Figure 17: CRMT multi mode.....	65
Figure 18: Cycle d'un agent radio cognitive.....	66
Figure 19: Organigramme représentant les types d'enchères .....	68
Figure 20: Topologie du réseau (mode ad hoc).....	69
Figure 21: Architecture basée sur la théorie des enchères .....	69
Figure 22: Diagramme de séquence "enchères à un seul tour" .....	70
Figure 23: Comportement du PU "enchères à un seul tour" .....	70
Figure 24: Comportement du SU "enchères à un seul tour" .....	71
Figure 25: Diagramme de séquence "enchères à plusieurs tours".....	71
Figure 26: Comportement du PU dans les enchères à plusieurs tours .....	72
Figure 27: Comportement du SU dans les enchères à plusieurs tours .....	72
Figure 28: FIFO vs FIFO'.....	73
Figure 29: Diagramme FIFO' .....	74
Figure 30: Architecture basée sur les techniques de décision multicritères à base d'agents coalitions.....	75
Figure 31: Scénario proposé.....	76
Figure 32: Diagramme de séquence TOPSIS .....	77
Figure 33: Comportement du PU lors de l'application de l'algorithme TOPSIS.....	77
Figure 34: Comportement du SU lors de l'application de l'algorithme TOPSIS.....	78
Figure 35: Comportement du CPU lors de l'application de l'algorithme TOPSIS .....	78
Figure 36: Architecture à base d'agents coalitions CPU et CSU.....	79
Figure 37: Comportement du SU lors de l'utilisation des coalitions.....	80
Figure 38: Comportement du CPU lors de l'utilisation des coalitions .....	81
Figure 39: Comportement du CSU lors de l'utilisation des coalitions .....	81
Figure 40: Scénario CSU avec CPU .....	82
Figure 41: Un PU et plusieurs SU .....	86
Figure 42: Scénario proposé.....	86

Figure 43: Algorithme pour les enchères à enveloppes scellées au premier prix .....	87
Figure 44: Agent Sniffer pour l'enchère à un seul tour avec programmation dynamique .....	88
Figure 45: Algorithme enchères anglaises .....	89
Figure 46: Comparaison entre les deux algorithmes en termes de temps .....	89
Figure 47: Impact des enchères sur le nombre de SU satisfaits .....	90
Figure 48: Impact des enchères sur le nombre de SU satisfaits .....	91
Figure 49: Impact des enchères sur les gains obtenus :.....	92
Figure 50: Agent Sniffer pour l'enchère à Enveloppe scellée avec algorithme glouton .....	93
Figure 51: Agent Sniffer pour la technique FIFO' .....	94
Figure 52: Impact des enchères sur le nombre de SU satisfaits. ....	94
Figure 53: Impact des enchères sur le gain obtenu par le PU. ....	95
Figure 54: Temps du traitement coté PU par rapport au nombre de SU .....	96
Figure 55: Temps de réponse par rapport aux taux d'arrivée des SU.....	96
Figure 56: Schéma Un SU et plusieurs PU .....	97
Figure 57: Sniffer avec 1 canal demandé coté SU .....	98
Figure 58: Sniffer avec 3 canaux demandés coté SU.....	98
Figure 59: Sniffer avec 5 canaux demandés coté SU.....	99
Figure 60: Impact du nombre de PU sur le temps de réponse coté SU.....	99
Figure 61: Agent Sniffer pour la méthode TOPSIS .....	101
Figure 63: Impact de l'implémentation des coalitions sur le temps de réponse coté SU .....	102
Figure 64: multicritères VS monocritère.....	103
Figure 65: Complexité en nombre de messages.....	104
Figure 66: Complexité en nombre de messages dans les 3 cas .....	106

## Liste des tableaux

Tableau 1: Langages de la radio cognitive.....	22
Tableau 2: Comparatif entre agent cognitif et agent réactif.....	33
Tableau 3: Classification des situations d'interaction .....	40
Tableau 4: Différence entre des enchères classique et dans les réseaux RC.....	49
Tableau 5: Comparaison entre un agent et une radio cognitive .....	56
Tableau 6: Récapitulatif des propriétés des SMA dans la RC .....	63
Tableau 7: fonctionnement du scénario proposé.....	76
Tableau 8: Types de négociation.....	85
Tableau 9: Jeu de données.....	97
Tableau 10: Temps de réponse coté SU(ms) par rapport au nombre de PU .....	102
Tableau 11: Nombre de messages échangés entre le SU et les CPU pendant la négociation	103
Tableau 12: Nombre de messages échangés par rapport au nombre de SU dans chaque CS	105

# Introduction générale

## 1. Contexte

Le domaine des télécommunications est en constante évolution, il tend à prendre une place de plus en plus importante dans les sociétés actuelles. En effet, les technologies se succèdent et offrent des débits de plus en plus élevés. Ceci dit, ce développement est en train de subir un blocage à cause de la pénurie du spectre.

Il faut savoir que certaines bandes de fréquence et réseaux sont d'ores et déjà surchargés aux heures de pointe. Cependant, l'utilisation du spectre de fréquence n'est pas uniforme : selon les heures de la journée, selon la position géographique, une bande fréquentielle peut être surchargée pendant qu'une autre reste inutilisée. L'idée a donc naturellement émergé de développer des outils permettant de mieux utiliser le spectre.

Pour résoudre le problème de la rareté du spectre et pour garantir une meilleure qualité de service aux utilisateurs, la radio cognitive (RC) est le concept qui permet de répondre à ce défi.

La RC est une nouvelle approche de communications sans fil qui est dotée d'une intelligence lui permettant d'ajuster ses paramètres (fréquence, puissance, modulation, bande passante) en fonction de son environnement, de la position géographique et des besoins de l'utilisateur.

## 2. Motivations

Le principe de la RC consiste en l'utilisation opportuniste du spectre, c'est-à-dire détecter intelligemment les canaux de communication vacants. La RC offre également une solution équilibrée au problème de l'encombrement du spectre en accordant d'abord l'usage prioritaire au propriétaire du spectre, puis en permettant à d'autres de se servir des portions inutilisées du spectre.

La problématique de nos travaux de recherche consiste à proposer une technique qui permet d'améliorer l'utilisation du spectre en utilisant la RC. En effet, le réseau RC peut être divisé en deux catégories: utilisateurs primaires (PU) qui ont un accès contrôlé et donc prioritaire au spectre et utilisateurs secondaires (SU) cognitifs.

Ceci dit, lorsqu'il n'y a qu'un seul SU qui a besoin de couverture, il n'y a aucun problème et tout se passe normalement. Mais lorsqu'il y a plusieurs SU au même endroit et au même moment, ceci peut engendrer des problèmes d'encombrement: qui va accéder aux canaux libres du spectre et qui va céder sa place ? Là est la problématique principale de notre travail de thèse. Autrement, comment plusieurs utilisateurs peuvent gérer efficacement le spectre.

L'application des approches de l'intelligence artificielle (IA) dans la RC est très prometteuse, en effet, elle est utilisée dans la mise en œuvre de l'architecture des réseaux RC. Ces derniers doivent pouvoir coexister pour rendre les systèmes de la RC pratiques, ce qui peut générer des

interférences aux autres utilisateurs. Afin de traiter ce problème, l'idée de la coopération entre les utilisateurs pour détecter et partager le spectre sans causer d'interférences est mise en place.

L'objectif de cette thèse est de gérer intelligemment les ressources radios dans le cadre d'un réseau RC. Pour cela, des algorithmes de négociation et de coopération issus du domaine multi-agents sont exploités afin d'assurer une répartition plus efficace du spectre.

En effet, un système multi-agents (SMA) est un regroupement d'agents où chaque agent possède une ou plusieurs compétences élémentaires. Le but est de faire travailler ensemble les agents pour résoudre un problème ou effectuer une tâche spécifique.

L'association des SMA avec la RC assure un futur remarquable pour la gestion optimale du spectre. Afin de proposer une méthode évolutive, il nous est apparu pertinent d'étudier en détail la notion de SMA et d'imaginer un scénario sur lequel nous allons mettre en pratique cette technique dans le cadre d'un réseau RC.

### **3. Contributions**

Notre contribution dans le cadre de cette thèse consiste à améliorer la fonctionnalité de gestion et partage du spectre dans les réseaux RC. Généralement, les utilisateurs ont une connaissance limitée de leur environnement, par conséquent, nous prétendons que le comportement coopératif peut leur fournir les informations nécessaires pour résoudre les problèmes.

Tout d'abord, nous avons jugé important de faire une synthèse sur l'utilisation des SMA dans le contexte de la RC afin de définir les différentes propriétés du SMA que nous allons utiliser pour nos approches.

Après cela, nous avons proposé une architecture multi-agents composée de trois niveaux: le premier est le niveau physique où nous avons donné quelques remarques sur le type de terminal utilisé dans nos scénarios, vient ensuite le niveau cognitif où nous avons proposé un cycle de cognition modifié sur la base des SMA et enfin le niveau comportemental où nous avons étudié les différents comportements que peuvent avoir les agents au moment de la négociation du spectre.

En effet, nous avons étudié plusieurs types de négociations. Dans un premier temps, nous avons commencé par le cas où il y a un seul PU et plusieurs SU. Ensuite, nous avons traité le cas où il y a plusieurs PU et un seul SU et pour finir, le scénario où il y a plusieurs PU et plusieurs SU.

Pour chacun des scénarios, nous avons utilisé une technique différente et ensuite comparé les résultats. Notre première idée était d'utiliser la théorie des enchères pour la négociation entre les PU et les SU, nous avons donc utilisé deux types d'enchères: à un seul tour et à plusieurs tours en utilisant différents algorithmes et nous avons comparé les résultats.

Nous nous sommes ensuite concentrés sur les enchères récentes où le prix n'est plus le seul critère utilisé pour la vente, ceci nous a mené à étudier les algorithmes de la décision multicritères et nous avons utilisé l'algorithme TOPSIS pour choisir la meilleure offre.

Nous avons également introduit la notion de coalitions dans le but de regrouper les utilisateurs primaires et secondaires et réduire le temps de réponse ainsi que le nombre de messages échangés dans le réseau.

Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation de toutes ses techniques permet de mieux utiliser le spectre pour assurer un partage efficace et un gain de temps important.

### 4. Organisation

Ce document se décompose en quatre chapitres qui se répartissent comme suit:

**Le premier chapitre** introduit le concept de la RC. Nous allons expliquer brièvement la notion de réseaux sans fils et mobiles. Nous passerons ensuite en revue l'évolution de la radio logicielle à la RC. Après cela, nous détaillerons le principe de la RC en passant par les fonctionnalités, les composants, l'architecture et le cycle de cognition. Enfin, nous donnerons un petit état de l'art sur l'utilisation des algorithmes de l'intelligence artificielle dans la RC.

**Le deuxième chapitre** se concentre sur la notion de SMA. Nous étudierons en détail les différents types d'agents ainsi que leurs caractéristiques et leurs architectures. Ensuite, nous décrirons l'environnement et l'organisation au sein d'un SMA. Après cela, nous mettrons en évidence les différents types d'interaction entre agents, en particulier, la négociation où plusieurs algorithmes ont été cités et utilisés dans ce domaine. Pour enfin donner un état de l'art détaillé sur l'utilisation des SMA dans la RC.

**Le troisième chapitre** s'attarde à décrire la contribution que nous apportons pour résoudre le problème de l'encombrement du spectre. Tout d'abord, nous donnerons une synthèse sur l'utilisation des SMA dans la RC. Pour ensuite décrire l'architecture que nous proposons dans ce contexte où nous détaillerons les différents niveaux. Nous donnerons des diagrammes expliquant le fonctionnement des algorithmes que nous proposons et le comportement des différents types d'agents au sein du SMA que nous utilisons.

**Le quatrième chapitre** décrit les expérimentations effectuées pour la négociation du spectre ainsi que les résultats obtenus avec les différents algorithmes de la théorie des enchères et de décision multicritères pour chacun des scénarios traités.

# **CHAPITRE I**

## **Récapitulatif sur les réseaux de radio cognitive**

## I. CHAPITRE I: Récapitulatif sur les réseaux de radio cognitive

### I.1 Introduction

Les réseaux mobiles et sans fil ont connu un progrès très important ces dernières années. En effet, les réseaux locaux sans fil sont utilisés quotidiennement grâce aux standards phares tels que WiFi, Bluetooth, etc... et aussi le déploiement de plusieurs générations successives de réseaux de télécommunication essentiellement dédiés à la téléphonie puis plus orientés vers le multimédia.

Nous assistons actuellement à la multiplication des normes et des standards de télécommunication vu les progrès récents dans ce domaine. Le nombre croissant de standards normalisés permet d'élargir l'éventail des offres et des services disponibles pour chaque consommateur, d'ailleurs, la plupart des radiofréquences disponibles ont déjà été allouées.

Il est aujourd'hui largement reconnu que les systèmes sans fil de communications numériques n'exploitent pas l'intégralité de la bande de fréquence disponible. Les systèmes sans fil de futures générations seront donc amenés à tirer parti de l'existence des bandes de fréquence inoccupées, grâce à leur faculté d'écouter et de s'adapter à leur environnement.

En effet, le développement de nouvelles technologies a toujours été dicté par les besoins du moment et la disponibilité de la technique. Nous sommes ainsi passés de la radio analogique à la radio numérique avec tous les progrès qui s'en sont suivis notamment au niveau de la qualité, la rapidité et la fiabilité du transport de l'information mais aussi au niveau de la capacité du réseau.

Au fil des années, les besoins se sont multipliés et de nouvelles solutions techniques sont apparues. Cela a conduit à l'idée de radio logicielle qui au début était prévue pour des applications militaires mais qui s'est progressivement transférée vers le domaine civil. La radio cognitive correspond à l'étape suivante et l'émergence de ce concept est à relier directement au besoin de gérer toute cette nouvelle complexité relative à l'environnement du terminal radio.

La radio cognitive (RC) est apparue comme une technologie clé, qui permet un accès opportuniste au spectre et répondre directement au besoin lié à la gestion de l'environnement du terminal radio.

Dans ce chapitre nous allons présenter rapidement les réseaux sans fil ainsi que la norme IEEE 802.22 ensuite nous nous intéresserons aux réseaux de radio cognitive avec leur fonctionnement, leur architecture et leurs différents domaines d'application. Nous finirons le chapitre par donner un aperçu sur l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle dans la RC.

## **I.2 Réseaux sans fil et mobiles**

### **I.2.1 Réseaux sans fil**

Un réseau sans fil (Wireless network) est, comme son nom l'indique, un réseau dans lequel au moins deux terminaux peuvent communiquer sans liaison filaire.

Un réseau local sans fil véhicule les informations soit par infrarouge, soit par onde radio. La transmission par onde radio est la méthode la plus répandue en raison de sa plus large couverture géographique et de son débit plus grand.

Les réseaux sans fil permettent de relier très facilement des équipements distants d'une dizaine de mètres à quelques kilomètres. De plus l'installation de tels réseaux ne demande pas de lourds aménagements des infrastructures comme c'est le cas avec les réseaux filaires, ce qui a valu un développement rapide de ce type de technologies.

Les transmissions radioélectriques servent pour un grand nombre d'applications, mais sont sensibles aux interférences, c'est la raison pour laquelle une réglementation est nécessaire dans chaque pays afin de définir les plages de fréquence et les puissances auxquelles il est possible d'émettre pour chaque catégorie d'utilisation [1].

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

### **I.2.2 Réseaux mobiles**

Un utilisateur mobile est défini théoriquement comme un utilisateur capable de communiquer à l'extérieur de son réseau d'abonnement tout en conservant une même adresse.

La mobilité dans les réseaux de communication est définie comme la capacité d'accéder, à partir de n'importe où, à l'ensemble des services disponibles dans un environnement fixe et câblé.

Tandis que, l'informatique mobile est définie comme la possibilité pour des usagers munis de périphériques portables d'accéder à des services et à des applications évoluées, à travers une infrastructure partagée de réseau, indépendamment de la localisation physique ou du mouvement de ces usagers.

## **I.3 Norme IEEE 802.22**

IEEE 802.22 est un nouveau groupe de travail du comité de normalisation d'IEEE 802 LAN/MAN qui vise à construire l'utilisation sans fil du réseau de région (WRAN) des espaces blancs (canaux qui ne sont pas déjà utilisés) dans le spectre assigné de fréquence de TV.

La norme IEEE 802.22 est une norme de radio cognitive visant à doter les régions rurales moins peuplées d'un accès à large bande en utilisant des canaux de télévision vacants. De part le fait que les niveaux du bruit industriel et des réflexions ionosphériques demeurent relativement bas, que les antennes présentent des dimensions raisonnables et que les caractéristiques de propagation sans visibilité directe sont très bonnes, les bandes de radiodiffusion télévisuelle dans la gamme des VHF et des UHF se révèlent idéales pour la couverture de vastes régions rurales à faible densité de population.

Le large recours aux technologies de radio cognitive, comme la détection RF, la géolocalisation, l'accès aux bases de données sur les titulaires de station de radiodiffusion, la sélection dynamique de fréquence, vise à assurer la coexistence avec les titulaires de station de radiodiffusion sur une base de non-brouillage ainsi que la coexistence interne avec d'autres systèmes WRAN conformes à la norme 802.22 pour maximiser l'utilisation du spectre [2].

#### **I.4 Règlements**

L'Union internationale des télécommunications (UIT) est une institution spécialisée des Nations Unies qui gère les spectres radio depuis 1927. L'UIT attribue des plages de fréquences entre 3 kilohertz et 300 gigahertz, qui correspondent à différents types d'utilisations. Ensuite une autorité compétente de Gestion du Spectre gère son utilisation conformément à UIT, telle que ARCEP (Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes) en France ou la FCC (Federal Communications Commission) aux Etats Unis. Ces fréquences accueillent plusieurs types d'activités commerciales, personnelles, industrielles, publiques ou privées, parmi les activités les plus demandées figurent les activités de télécommunications qui constituent un outil très important pour le développement économique et social [3][4].

Le spectre radio est une ressource rare, sa gestion doit être réglementée au niveau international. Il ne s'agit pas simplement d'une question pratique car ces ondes ne respectent pas les frontières d'Etats souverains. La gestion du spectre comprend à la fois l'attribution des bandes de fréquences en veillant à leur utilisation prévue sans interférence, et l'obtention du rendement maximal du spectre. En effet, les fréquences élevées en raison de leurs bandes passantes accrues peuvent porter d'avantage d'information par rapport aux fréquences basses.

D'après une étude réalisée par la Shared Spectrum Company (SSC) de janvier 2004 jusqu'à Août 2005, certaines bandes de fréquence sont déjà surchargées aux heures de pointe, néanmoins, d'autres le sont beaucoup moins. Ce qui fait que le taux d'utilisation du spectre de fréquence est relativement faible.

Au fur et à mesure du temps, il y a eu une importante augmentation du nombre d'abonnés souscrivant à des services sans fil en tout genre, en plus de la demande croissante du très haut débit partout et tout le temps, et l'augmentation exponentielle des données échangées par les usagers, les différents pays ont été obligés de rechercher une nouvelle manière d'utiliser le spectre, ainsi est venue l'idée de la gestion dynamique du spectre.

## **I.5 Radio logicielle (software radio)**

C'est grâce aux travaux de Joseph Mitola que le terme radio logicielle est apparu en 1991 pour définir une classe de radio reprogrammable et reconfigurable.

La radio logicielle est une radio dans laquelle 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. La radio logicielle moderne intègre également l'implantation logicielle des procédés de cryptographie, codage correcteur d'erreur, codage source de la voix, de la vidéo ou des données.

La radio logicielle permet, idéalement, à des équipements de communiquer avec n'importe quel standard de radiocommunication par la seule modification du logiciel embarqué [5][6], et donc sans modification d'un quelconque élément matériel.

Le concept de radio logicielle 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.

La radio logicielle est le but ultime intégrant toute les fonctionnalités en logiciel, mais elle impose des phases intermédiaires combinant anciennes et nouvelles techniques, on parle alors de radio logicielle restreinte (*software defined radio*). Les contraintes de puissance de calcul, de consommation électrique, de coûts, etc. imposent actuellement de passer par cette phase intermédiaire [7].

### **I.5.1 Radio logicielle restreinte (SDR)**

La radio logicielle restreinte (SDR) est un système de radiocommunication qui caractérise une technologie qui permet une résolution des problèmes de la gestion dynamique du spectre tout en assurant et procurant une flexibilité. L'utilisation de cette technologie offre de nouvelles fonctionnalités sans fil hétérogènes (SDR idéal) avec les compétences qui peuvent être ajoutées aux systèmes radio existants sans nécessiter de matériel nouveau.

Les équipements SDR peuvent fonctionner dans des réseaux sans fil hétérogènes c'est-à-dire qu'un SDR idéal peut s'adapter automatiquement aux nouvelles fréquences et aux nouvelles modulations.

### **I.5.2 De l'idée de radio logicielle à la radio cognitive**

Il faut savoir que la radio logicielle est incluse dans la radio cognitive, elle représente son point de départ. Ce sont ajoutées à ce concept, l'aptitude cognitive, la capacité de raisonnement, une intelligence ainsi qu'une modélisation de son environnement.

L'une des principales caractéristiques de la radio cognitive est la capacité d'adaptation où les paramètres de la radio (fréquence porteuse, puissance, modulation, bande passante) peuvent

être modifiés en fonction de l'environnement radio, la situation, les besoins de l'utilisateur, l'état du réseau, la géolocalisation,...etc.

La radio logicielle est capable d'offrir les fonctionnalités de flexibilité, de reconfigurabilité et de portabilité inhérentes à l'aspect d'adaptation de la radio cognitive. Par conséquent, cette dernière doit être mise en œuvre autour d'une radio logicielle. En d'autres termes, la radio logicielle est une "technologie habilitante" pour la radio cognitive [8].

Bien que de nombreux modèles différents soient possibles, l'un des plus simples modèles conceptuels qui décrit la relation entre la radio cognitive et la radio logicielle restreinte est illustré dans la figure 1.

Dans ce modèle simple, les éléments de la radio cognitive entourent le support radio logicielle restreinte.

Le moteur cognitif représente la partie chargée de l'optimisation ou du contrôle du module radio logicielle restreinte en se basant sur quelques paramètres d'entrée tels que les informations issues de la perception sensorielle ou de l'apprentissage de l'environnement radio, du contexte utilisateur, et de l'état du réseau.

La figure suivante extraite de [9][10] est une illustration de l'architecture de la radio cognitive.

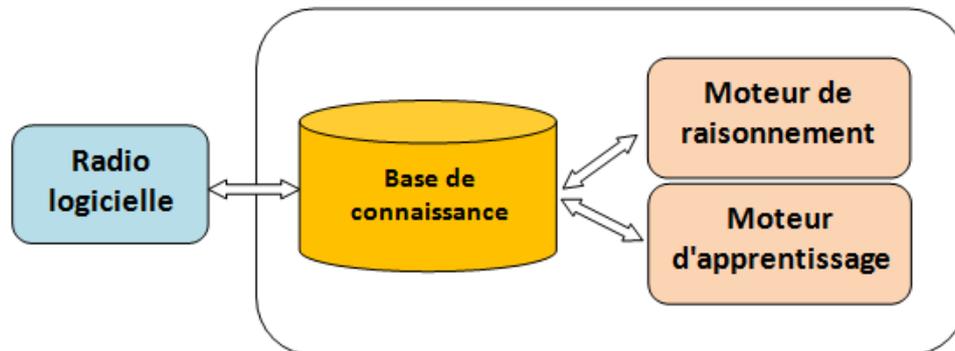


Figure 1: Architecture de la radio cognitive

La relation entre la RC et la SDR est définie par un modèle simple qui est représenté dans la figure 1. Dans ce modèle, les éléments de la RC entourent le support SDR et le cognitive engine qui est nécessaire pour la prise de décision et l'apprentissage de l'environnement radio dans un nuage qui exploite efficacement les ressources disponibles.

Nous apercevons ici que la radio logicielle (Software Radio) est associée à un moteur d'intelligence. Ce moteur peut être envisagé comme une encapsulation extensible de modules logiciels alliés à une base de connaissance (Knowledge Base). L'architecture jouit d'une flexibilité qui indique la possibilité d'agrégation de modules en complément de ceux du raisonnement et de l'apprentissage donnés en exemple.

Lorsque maintes actions se présenteraient parmi un tas de possibilités, l'outil de raisonnement primerait et serait de taille à gérer toutes sortes de situations. Il opterait pour la bonne décision

et le choix adéquat. L'outil d'apprentissage s'occuperait par la suite de la construction de règles par renforcement en s'appuyant sur les paramètres reçus de la radio logicielle enregistrés au niveau de la base de connaissance.

Contrairement à la radio logicielle, la radio cognitive introduit un langage appelé RKRL (Radio Knowledge Representation Language), et permet de faire une communication intelligente entre différents types de terminaux en sein d'un réseau sans fil, ainsi d'après Mitola : «Une radio cognitive peut connaître, percevoir et apprendre de son environnement puis agir pour simplifier la vie de l'utilisateur.»

## **I.6 Réseaux de radio cognitive**

### **I.6.1 Historique**

L'idée de la radio cognitive a été présentée officiellement par Joseph Mitola III 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 [8].

Connu comme le « Père de la radio logicielle ». Mitola est l'un des auteurs les plus cités dans le domaine. Il combine son expérience de la radio logicielle ainsi que sa passion pour l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle pour mettre en place la technologie de la radio cognitive. Son travail consiste à décrire les radios intelligentes qui peuvent prendre des décisions de manière autonome en utilisant les informations recueillies sur l'environnement RF grâce à un modèle basé sur le raisonnement, et peut également apprendre et planifier en fonction de leur expérience passée.

### **I.6.2 Définitions**

La « cognition » est un processus par lequel on acquiert des connaissances, elle regroupe les divers processus mentaux allant de l'analyse perceptive de l'environnement à la commande motrice (en passant par la mémorisation, le raisonnement, les émotions, le langage...).

Le terme radio cognitive est utilisé pour décrire un système ayant la capacité de détecter et de reconnaître son cadre d'utilisation, ceci afin de lui permettre d'ajuster ses paramètres (fréquence, puissance, modulation, bande passante) de fonctionnement radio de façon dynamique et autonome et d'apprendre des résultats de ses actions et de son cadre environnemental d'exploitation, comme le souligne Dr. Mitola.

Cette capacité permet d'adapter chaque appareil aux conditions spectrales du moment et offre donc aux utilisateurs un accès plus souple, efficace et complet à cette ressource. Cette approche peut améliorer considérablement le débit des données et la portée des liaisons sans augmenter la bande passante ni la puissance de transmissions. La radio cognitive offre également une solution équilibrée au problème de l'encombrement du spectre en accordant d'abord l'usage prioritaire au propriétaire du spectre, puis en permettant à d'autres de se servir des portions inutilisées du spectre.

Le SDR Forum (*élaboration des normes industrielles du matériel et du logiciel des technologies, en ce moment il mène des travaux de recherches sur la radio cognitive et l'efficacité du spectre*) et le groupe de travail P1900 de l'IEEE ont approuvé en Novembre 2007 cette définition :

- "Une radio intelligente est une radio dans laquelle les systèmes de communications sont conscients de leur environnement et état interne, et peuvent prendre des décisions quant à leur mode de fonctionnement radio en se basant sur ces informations et objectifs prédéfinis. Les informations issues de l'environnement peuvent comprendre ou pas des informations de localisation relatives aux systèmes de communication".

Le principe de la radio cognitive, repris dans la norme IEEE 802.22, nécessite une gestion alternative du spectre qui est la suivante : un mobile dit secondaire pourra à tout moment accéder à des bandes de fréquence qu'il trouve libres, c'est-à-dire, non occupées par l'utilisateur dit primaire possédant une licence sur cette bande. L'utilisateur secondaire devra les céder une fois le service terminé ou une fois qu'un utilisateur primaire aura montré des velléités de connexion.

Un réseau cognitif coordonne les transmissions suivant différentes bandes de fréquences et différentes technologies en exploitant les bandes disponibles à un instant donné et à un endroit donné. Il a besoin d'une station de base capable de travailler sur une large gamme de fréquences afin de reconnaître différents signaux présents dans le réseau et se reconfigurer intelligemment.

### **I.6.3 Principe**

Puisque la majeure partie du spectre est déjà assignée, le défi le plus important est de partager le spectre autorisé. La radio cognitive permet l'utilisation de spectre temporellement inutilisé, qui est mentionné comme trou de spectre ou espace blanc. Si cette bande est encore utilisée par un utilisateur autorisé, la RC offre des mouvements à un autre espace blanc, en changeant son niveau de puissance de transmission ou arrangement de modulation pour éviter l'interférence. De part cette vision, deux éléments sont omniprésents dans chaque communication radio cognitive.

#### ***a Utilisateurs primaires***

Ces utilisateurs (dit utilisateurs licenciés) sont des utilisateurs qui disposent d'une licence qui leur permet d'opérer sur des bandes spectrales qui leurs sont réservées, ainsi ils ont le droit de communiquer en toute liberté à tout instant sur leurs bande de fréquence.

#### ***b Utilisateurs secondaires***

Ces utilisateurs ne possédant pas de licence, ils accèdent au spectre de façon opportuniste, mais ils doivent veiller à ne pas gêner les utilisateurs primaires, en effet ils doivent prendre la responsabilité de ne jamais interférer avec les utilisateurs primaires.

En effet, à un temps donné et à un emplacement géographique spécifique, il arrive qu'un utilisateur primaire n'utilise plus sa bande de fréquence, ainsi d'autres utilisateurs secondaires peuvent exploiter ces fréquences grâce à des trous dans le spectre comme le montre la figure 2

ci-dessous, et ça, sans perturber les communications des utilisateurs primaires, néanmoins, les systèmes sans fil existants ont été conçus pour fonctionner sur des fréquences dédiées, ce qui fait qu'ils ne pourront pas profiter de cette flexibilité prévue.

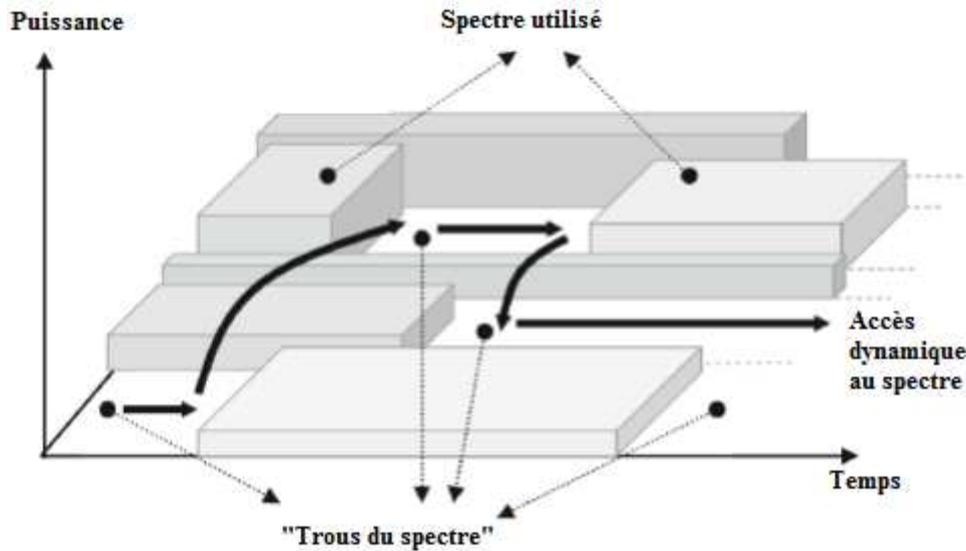


Figure 2: Le concept des trous du spectre [11]

### I.6.4 Architecture de la radio cognitive

La structure de la radio cognitive serait cette homogénéité d'une multitude de lois de conception grâce à laquelle un ensemble distinct de composants produit une succession de fonctions, de produits et de services. Telle est l'explication fournie par [8].

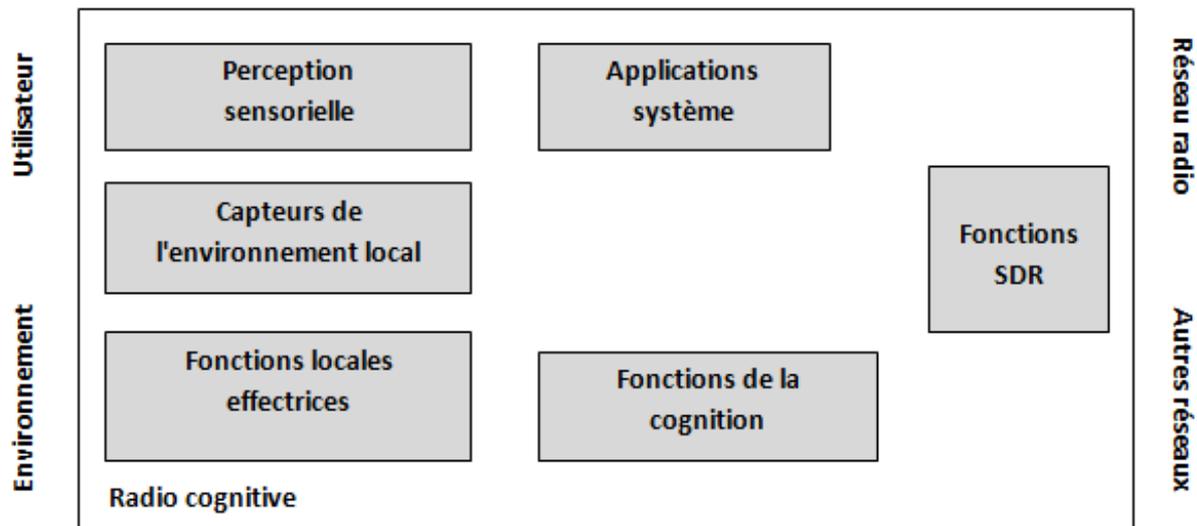


Figure 3: Architecture de la radio cognitive.

Les six composantes fonctionnelles de l'architecture d'une radio cognitive sont:

- 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, d'apprentissage).
- Les fonctions locales effectrices (synthèse de la parole, du texte, des graphiques et des affiches multimédias).

Une architecture cognitive spécifie la structure d'un système ou d'un agent intelligent.

L'utilisation de la boucle OODA (Observe, Orient, Decide and Act) pour la RC a été proposée initialement par Mitola [8] . Ensuite Haykin [12] a proposé une simple architecture pour l'accès dynamique au spectre et a insisté sur le fait qu'il faut que les nœuds de la RC soient conscients de leur environnement pour éviter les interférences.

Il faut savoir aussi que le comité de standards IEEE dynamic spectrum access networks (DySPAN-SC) a proposé une architecture fonctionnelle pour les réseaux de RC supportant l'accès dynamique au spectre.

Les auteurs de [13] ont résumé les différentes architectures cognitives possibles telles que (ACT-R, SOAR...). En effet, ils se sont basés sur l'architecture proposée par [14] et ont développé une solution OBR (Ontology Based Radio) pour l'architecture et le développement de la RC sachant que le processus interne dans OBR est basé sur la boucle OODA. Les auteurs ont précisé que la partie « observation » inclue non seulement les mesures du spectre mais aussi les entrées des autres capteurs.

Les auteurs dans [15] ont proposé une nouvelle architecture de radio cognitive en tenant compte de 4 éléments essentiels (gestion des objectifs de bout en bout, gestion de la cognition, gestion de l'auto organisation, gestion de la reconfiguration). Ils ont ensuite testé l'architecture proposée en l'appliquant sur un cas d'utilisation et il s'est avéré que l'architecture est flexible et extensible car les composants peuvent être ajustés ou remplacés indépendamment sans déranger les autres composants de l'architecture.

Les auteurs de [16] supposent que le comportement des SU peut être honnête ou malhonnête. C'est pour cela qu'ils ont proposé une nouvelle méthode pour la détection du spectre pour identifier le comportement malhonnête du SU. Pour cela, ils ont adopté une infrastructure centralisée où les SU ne sont pas capables de communiquer avec les PU directement mais la communication se fera entre les stations de base respectives des PU et SU. Autrement, il y a un réseau de PU qui communiquent entre eux à travers une station de base qu'ils ont appelé PUBS et la même chose pour les SU (SUBS), donc la communication se fera entre PUBS et SUBS uniquement.

Le travail présenté dans [17] est très intéressant car les auteurs se sont concentrés sur l'aspect autonome de la RC. Ils ont modélisé le cycle de cognition en utilisant les principes de

l'informatique autonome et pensent que les nœuds de la RC avec une propriété d'autonomie fournit une nouvelle solution pour la résolution des problèmes des CRAHN's.

Un mapping entre les agents définis en intelligence artificielle et l'architecture de la RC a été fait dans [18].

Il y a aussi l'architecture proposée dans [19] qui est composée de 3 sous systèmes: un émetteur/récepteur numérique configurable, un module pour la détection du spectre et un module pour le contrôle et la gestion de la communication.

L'architecture du protocole de la radio cognitive est représentée dans la figure 4. Dans la couche physique, le RF est mis en œuvre à base de radio définie par logiciel. Les protocoles d'adaptation de la couche MAC, réseau, transport, et applications doivent être conscients des variations de l'environnement radio cognitif. En particulier, les protocoles d'adaptation devraient envisager l'activité du trafic des principaux utilisateurs, les exigences de transmission d'utilisateurs secondaires, et les variations de qualité du canal...

Pour relier tous les modules, un contrôle radio cognitif est utilisé pour établir des interfaces entre l'émetteur/récepteur SDR et les applications et services sans fil. Ce module radio cognitif utilise des algorithmes intelligents pour traiter le signal mesuré à partir de la couche physique, et de recevoir des informations sur les conditions de transmission à partir des applications pour contrôler les paramètres de protocole dans les différentes couches [20].

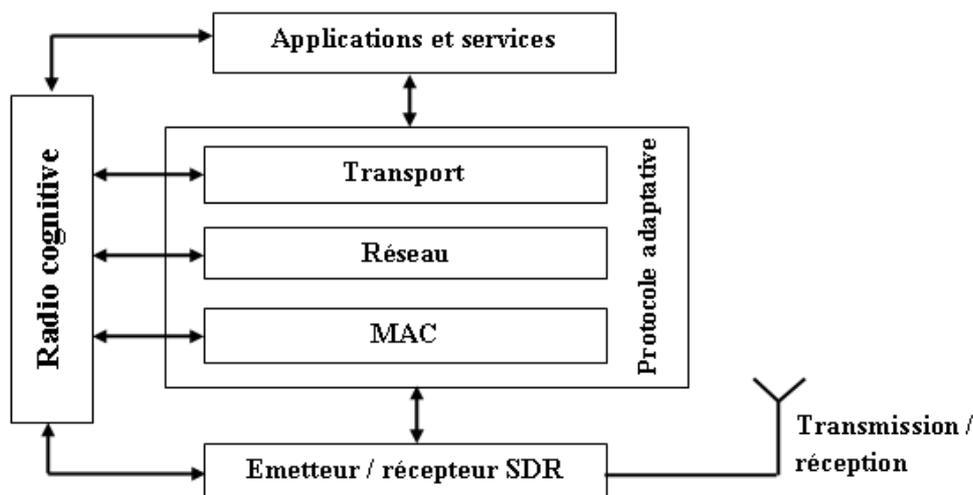


Figure 4: Protocoles utilisés par la radio cognitive

### I.6.5 Cycle de cognition

La cognition est dotée d'un cycle qui représente un schéma global détaillant l'ensemble des interactions entre plusieurs modules du système, l'environnement externe inclus.

Ce cycle synthétise cette composante de manière évidente. Les stimuli entrent dans la radio cognitive comme des interruptions sensorielles envoyées sur le cycle de la cognition pour une

réponse. Une telle radio cognitive observe l'environnement, s'oriente, crée des plans, décide, et puis agit [21].

La radio cognitive, suivant le cycle de la cognition, atteint le niveau d'autonomie espéré et une capacité de configuration dynamique de ses paramètres. En effet, l'observation (Observe) précise que tout ce qui l'environne constitue une quête d'information qui lui garantit la prise de décision (Decide) la mieux appropriée. L'orientation (Orient) est une étape majeure dans l'établissement des priorités, la classification par affinité ou en fonction de la demande et du besoin ainsi que la planification (Plan) des actions envisageables. Ce processus transite par l'étape d'apprentissage (Learn) motivé par l'expérience assimilée grâce à l'environnement.

#### ***a Phase d'observation (détecter et percevoir)***

La radio cognitive observe son environnement par l'analyse du flux de stimuli entrant. Dans la phase d'observation, la radio cognitive associe l'emplacement, la température, le niveau de lumière des capteurs, et ainsi de suite pour en déduire le contexte de communication. Cette phase lie ces stimuli à des expériences antérieures pour discerner les modèles au fil du temps. La radio cognitive rassemble les expériences en se souvenant de tout.

#### ***b Phase d'orientation***

La phase d'orientation détermine l'importance d'une observation en liant à celle-ci une série connue de stimuli. Cette phase fonctionne à l'intérieur des structures de données qui sont analogues à la mémoire à court terme (STM), que les gens emploient pour s'engager dans un dialogue sans forcément se souvenir de tout à la même mesure que dans la mémoire à long terme (LTM). Le milieu naturel fournit la redondance nécessaire pour lancer le transfert de la STM à la LTM. La correspondance entre les stimuli courants et les expériences stockées se fait par reconnaissance des stimuli ou par reliure.

La reconnaissance des stimuli se produit quand il y a une correspondance exacte entre un stimulus courant et une expérience antérieure. La réaction peut être appropriée ou dans l'erreur.

Chaque stimulus est situé dans un contexte plus large, qui inclut d'autres stimuli et les états internes, y compris le temps. Parfois, la phase d'orientation provoque une action qui sera lancée immédiatement comme un comportement réactif « stimulus-réponse ».

Une panne d'électricité, par exemple, peut directement invoquer un acte qui sauvegarde les données (le chemin « immediate » de la phase Action sur la figure 6). Une perte de signal sur un réseau peut invoquer une réaffectation de ressources. Cela peut être accompli via la voie marquée «urgent» dans la figure.

#### ***c Phase de planification***

Un message entrant du réseau serait normalement traité par la génération d'un plan (dans la phase de plan, la voie normale). Le plan devrait également inclure la phase de raisonnement dans le temps. Généralement, les réponses réactives sont préprogrammées ou apprises en étant dit, tandis que d'autres réactions de délibération sont prévues.

#### *d Phase de décision*

La phase de décision sélectionne un plan parmi les plans candidats. La radio peut alerter l'utilisateur d'un message entrant ou reporter l'interruption à plus tard en fonction des niveaux de QoI (Quality of Information) statués dans cette phase.

#### *e Phase d'action*

Cette phase lance les processus sélectionnés qui utilisent les effecteurs sélectionnés qui accèdent au monde extérieur ou aux états internes de la radio cognitive.

L'accès au monde extérieur consiste principalement à composer des messages qui doivent être envoyés dans l'environnement en audio ou exprimés dans différents langages appropriés.

Une action radio cognitive peut également actualiser les modèles internes, par exemple, l'ajout de nouveaux modèles aux modèles internes existants. L'acquisition de connaissances pourrait être achevée par une action qui crée les structures de données appropriées.

#### *f Phase d'apprentissage*

L'apprentissage dépend de la perception, des observations, des décisions et des actions. L'apprentissage initial est réalisé à travers la phase d'observation dans laquelle toutes les perceptions sensorielles sont continuellement comparées à l'ensemble de l'expérience antérieure pour continuellement compter les événements et se souvenir du temps écoulé depuis le dernier événement.

L'apprentissage peut se produire quand un nouveau modèle est créé en réponse à une action. Par exemple, les états internes antérieurs et courants peuvent être comparés avec les attentes pour en apprendre davantage sur l'efficacité d'un mode de communication [22].

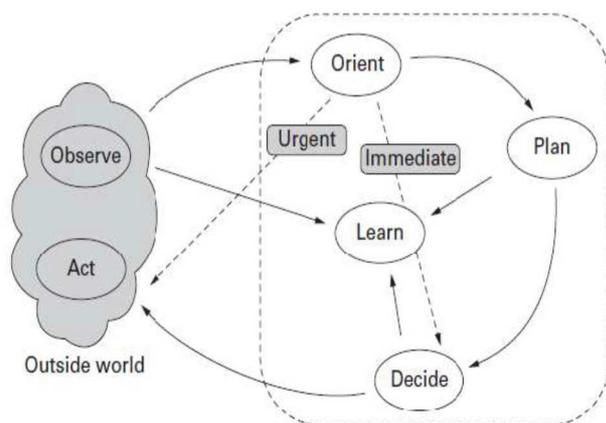


Figure 5: Cycle de cognition de Mitola

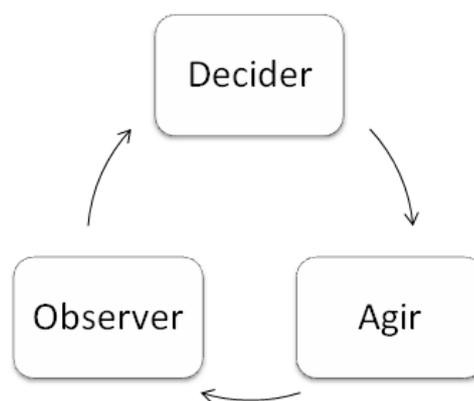


Figure 6: Cycle de cognition simplifié

### **I.6.6 Composantes de la radio cognitive**

Les différentes composantes d'un émetteur/récepteur radio cognitive qui mettent en œuvre ces fonctionnalités sont présentées dans la figure 7 [20].

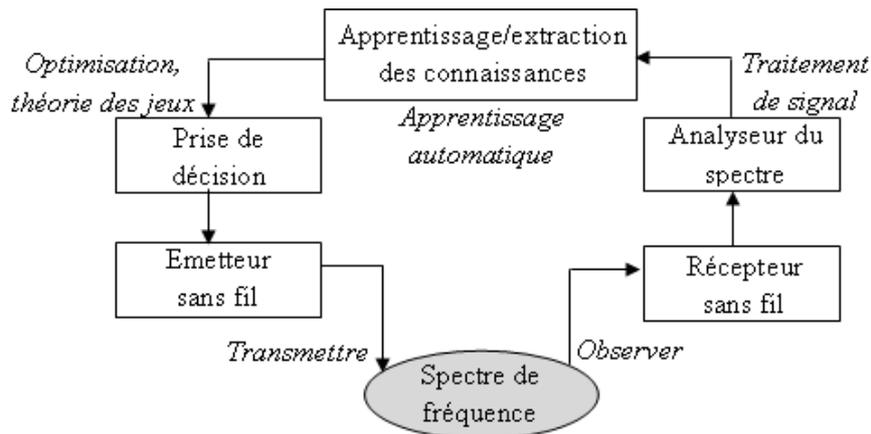


Figure 7: Composantes de la radio cognitive

**Emetteur / Récepteur:** un émetteur/récepteur SDR sans fil est le composant majeur avec les fonctions du signal de transmission de données et de réception. En outre, un récepteur sans fil est également utilisé pour observer l'activité sur le spectre de fréquence (spectre de détection). Les paramètres émetteur/récepteur dans le nœud de la radio cognitive peuvent être modifiés dynamiquement comme dicté par les protocoles de couche supérieure.

**Analyseur de spectre:** l'analyseur de spectre utilise les signaux mesurés pour analyser l'utilisation du spectre (par exemple pour détecter la signature d'un signal provenant d'un utilisateur primaire et trouver les espaces blancs du spectre pour les utilisateurs secondaires). L'analyseur de spectre doit s'assurer que la transmission d'un utilisateur primaire n'est pas perturbée si un utilisateur secondaire décide d'accéder au spectre. Dans ce cas, diverses techniques de traitement du signal peuvent être utilisées pour obtenir des informations sur l'utilisation du spectre.

**Extraction de connaissances et apprentissage:** l'apprentissage et l'extraction de connaissances utilisent les informations sur l'utilisation du spectre pour comprendre l'environnement ambiant RF (par exemple le comportement des utilisateurs sous licence). Une base de connaissances de l'environnement d'accès au spectre est construite et entretenue, qui est ensuite utilisée pour optimiser et adapter les paramètres de transmission pour atteindre l'objectif désiré sous diverses contraintes. Les algorithmes d'apprentissage peuvent être appliqués pour l'apprentissage et l'extraction de connaissances.

**Prise de décision:** après que la connaissance de l'utilisation du spectre soit disponible, la décision sur l'accès au spectre doit être faite. La décision optimale dépend du milieu ambiant, elle dépend du comportement coopératif ou compétitif des utilisateurs secondaires. Différentes techniques peuvent être utilisées pour obtenir une solution optimale.

Par exemple, la théorie d'optimisation peut être appliquée lorsque le système peut être modélisé comme une seule entité avec un seul objectif. En revanche, les modèles de la théorie des jeux peuvent être utilisés lorsque le système est composé d'entités multiples, chacun avec son propre objectif. L'optimisation stochastique peut être appliquée lorsque les états du système sont aléatoires.

### I.6.7 Fonctions de la radio cognitive

Le mécanisme de construction du système et de mise en œuvre des communications s'échoue sur un ensemble de difficultés techniques qui sont principalement basées sur la nécessité de fournir des modifications aux modèles et au matériel de communication existant. A un niveau moins important, une adaptation des terminaux ainsi que l'acquisition de nouveaux algorithmes plus performants, dont la consommation d'énergie est maîtrisable, semblent essentielles. Le terminal radio cognitif devra être dans la mesure d'apporter les fonctionnalités de reconfiguration automatique. Les principales fonctions de la radio cognitive sont les suivantes:

#### *a Détection du spectre (Spectrum sensing)*

Détecter le spectre non utilisé et le partager sans interférence avec d'autres utilisateurs. La détection des utilisateurs primaires est la façon la plus efficace pour détecter les espaces blancs du spectre.

L'un des objectifs de la détection du spectre, en particulier pour la détection des interférences, est d'obtenir le statut du spectre (libre /occupé), de sorte que le spectre peut être consulté par un utilisateur secondaire en vertu de la contrainte d'interférence. Le défi réside dans le fait de mesurer l'interférence au niveau du récepteur primaire causée par les transmissions d'utilisateurs secondaires.

#### *b Gestion du spectre (Spectrum management)*

Capter les meilleures fréquences disponibles pour répondre aux besoins de communication des utilisateurs.

Les radios cognitives devraient décider de la meilleure bande de spectre pour répondre aux exigences de qualité de service sur toutes les bandes de fréquences disponibles, donc les fonctions de gestion du spectre sont nécessaires pour les radios cognitives. Ces fonctions de gestion peuvent être classées comme suit:

- **Analyse du spectre**

Les résultats obtenus de la détection du spectre sont analysés pour estimer la qualité du spectre. Une des questions ici est de savoir comment mesurer la qualité du spectre qui peut être accédée par un utilisateur secondaire. Cette qualité peut être caractérisée par le rapport signal/bruit, la durée moyenne et la corrélation de la disponibilité des espaces blancs du spectre. Les informations sur cette qualité de spectre disponible à un utilisateur par radio cognitive peuvent être imprécises et bruyantes. Des algorithmes d'apprentissage de l'intelligence artificielle sont des techniques qui peuvent être employées par les utilisateurs de la radio cognitive pour l'analyse du spectre.

- **Décision sur le spectre**

➤ **Modèle de décision:** un modèle de décision est nécessaire pour l'accès au spectre. La complexité de ce modèle dépend des paramètres considérés lors de l'analyse du spectre.

Le modèle de décision devient plus complexe quand un utilisateur secondaire a des objectifs multiples. Par exemple, un utilisateur secondaire peut avoir l'intention de maximiser son

rendement tout en minimisant les perturbations causées à l'utilisateur primaire. Les méthodes d'optimisation stochastique (le processus de décision de Markov) seront un outil intéressant pour modéliser et résoudre le problème d'accès au spectre dans un environnement radio cognitif.

- **Compétition / coopération dans un environnement multi utilisateurs** : lorsque plusieurs utilisateurs (à la fois primaires et secondaires) sont dans le système, leur préférence va influencer sur la décision du spectre d'accès. Ces utilisateurs peuvent être coopératifs ou non coopératifs dans l'accès au spectre.

Dans un environnement non-coopératif, chaque utilisateur a son propre objectif, tandis que dans un environnement coopératif, tous les utilisateurs peuvent collaborer pour atteindre un seul objectif. Par exemple, plusieurs utilisateurs secondaires peuvent entrer en compétition les uns avec les autres pour accéder au spectre radio (par exemple, O1, O2, O3, O4 dans la figure 8) de sorte que leur débit individuel soit maximisé. Au cours de cette concurrence entre les utilisateurs secondaires, tous veillent à ce que l'interférence causée à l'utilisateur primaire est maintenue en dessous de la limite de température de brouillage correspondante. La théorie des jeux est l'outil le plus approprié pour obtenir la solution d'équilibre pour le problème du spectre dans un tel scénario.

Dans un environnement coopératif, les radios cognitives coopèrent les unes avec les autres pour prendre une décision pour accéder au spectre et de maximiser une fonction objective commune en tenant compte des contraintes. Dans un tel scénario, un contrôleur central peut coordonner le spectre de gestion.

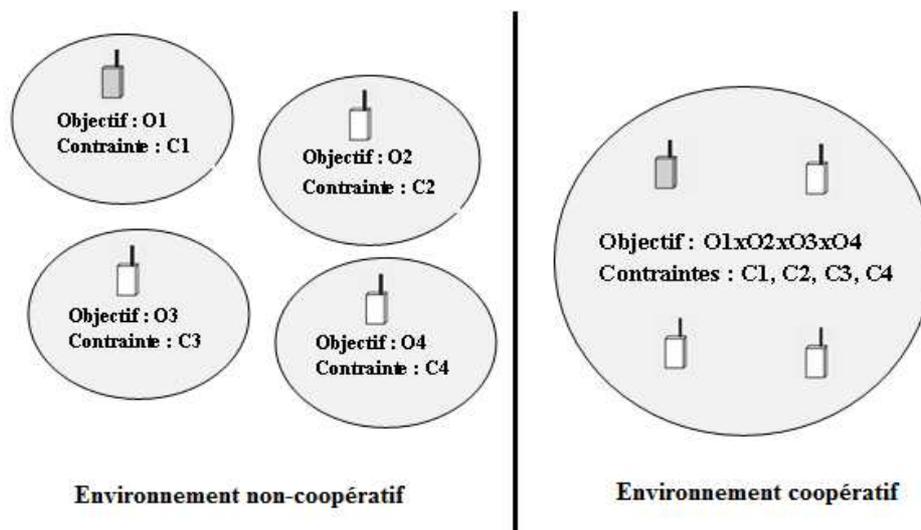


Figure 8: Accès au spectre coopératif et non-coopératif [20]

- **Mise en œuvre distribuée du contrôle d'accès au spectre** : dans un environnement multi utilisateur distribué, 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. Par conséquent, un algorithme distribué est

nécessaire pour un utilisateur secondaire pour prendre la décision sur l'accès au spectre de manière autonome.

*c Mobilité du spectre (Spectrum mobility)*

C'est le processus qui permet à l'utilisateur de la radio cognitive de changer sa fréquence de fonctionnement.

Les réseaux radio cognitifs essayent d'utiliser le spectre de manière dynamique en permettant à des terminaux radio de fonctionner dans la meilleure bande de fréquence disponible, de maintenir les exigences de communication transparentes au cours de la transition à une meilleure fréquence.

- **Recherche des meilleures bandes de fréquence**

La radio cognitive doit garder une trace des bandes de fréquence disponibles de sorte que si nécessaire (par exemple, un utilisateur autorisé est détecté), il peut passer immédiatement à d'autres bandes de fréquences. Lors de la transmission par un utilisateur secondaire, l'état de la bande de fréquences doit être respecté.

- **Auto-coexistence et synchronisation**

Quand un utilisateur secondaire effectue un transfert du spectre, deux questions doivent être prises en compte. Le canal cible ne doit pas être actuellement utilisé par un autre utilisateur secondaire (l'exigence d'auto-coexistence), et le récepteur de la liaison secondaire correspondant doit être informé de la non-intervention du spectre (la demande de synchronisation) [20].

## **I.6.8 Domaines d'application de la radio cognitive**

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

**Les réseaux sans fil de prochaine génération :** la radio cognitive devrait être une technologie clé pour la prochaine génération de réseaux sans fil hétérogènes. La radio cognitive fournira des renseignements intelligents à la fois pour l'utilisateur et pour le fournisseur d'équipements. Pour l'utilisateur, un dispositif mobile avec des interfaces d'air multiples (WiFi, WiMAX, cellulaires) peut observer l'état des réseaux d'accès sans fil (la qualité de transmission, débit, délai) et prendre une décision sur la sélection de l'accès au réseau pour communiquer avec. Pour le fournisseur, les ressources radio de plusieurs réseaux peuvent être optimisées pour l'ensemble des utilisateurs de mobiles et de leurs exigences de QoS (Qualité de Service).

**Coexistence de différentes technologies sans fil :** les nouvelles technologies sans fil (IEEE 802.22) sont en cours d'élaboration pour la réutilisation des fréquences radio allouées à d'autres services sans fil (service TV). La radio cognitive est une solution qui fournit la coexistence de ces différentes technologies et services sans fil. Par exemple, 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.

**Services de cyber santé (eHealth services):** différents types de technologies sans fil sont adoptés dans les services de santé pour améliorer l'efficacité de la prise en charge des patients et la gestion des soins de santé. Cependant, la plupart des dispositifs de soins utilisés sont sans fil et sont limités par les EMI (interférences électromagnétiques) et EMC (compatibilité électromagnétique).

Depuis que les équipements médicaux et les capteurs bio signal sont sensibles aux EMI, la puissance d'émission des appareils sans fil doit être soigneusement contrôlée. En outre, différents dispositifs biomédicaux (équipement et appareils chirurgicaux, de diagnostic et de suivi) utilisent la transmission RF. L'utilisation du spectre de ces dispositifs doit être choisie avec soin pour éviter toute interférence avec l'autre. Dans ce cas, les concepts de la radio cognitive peuvent être appliqués. Par exemple, de nombreux capteurs médicaux sans fil sont conçus pour fonctionner dans les ISM (industriel, scientifique et médicale), et donc ils peuvent utiliser les concepts de la radio cognitive pour choisir les bandes de transmission permettant d'éviter les interférences.

**Réseaux d'urgence:** les réseaux de sécurité publique et d'urgence peuvent profiter des concepts de la radio cognitive pour fournir la fiabilité et la flexibilité de communication sans fil. Par exemple, dans un scénario où il y a une catastrophe, l'infrastructure de communication standard peut ne pas être disponible, et par conséquent, un système de communication sans fil adaptatif (soit un réseau d'urgence) peut être nécessaire d'être créé pour soutenir la reprise après sinistre. Ce genre de réseau peut utiliser le concept de la radio cognitive pour permettre la transmission sans fil et la réception sur une large gamme du spectre radio.

**Réseaux militaires :** avec la radio cognitive, les paramètres de la communication sans fil peuvent être adaptés de manière dynamique en fonction du temps et de l'emplacement ainsi que de la mission des soldats. Par exemple, si certaines fréquences sont brouillées ou bruyantes, les dispositifs radio cognitifs (émetteurs/récepteurs) peuvent effectuer des recherches pour trouver des bandes de fréquence d'accès de rechange pour la communication.

### **I.6.9 Langages de la radio cognitive**

Deux problèmes surgissent. D'abord, le réseau n'a aucun langage standard avec lequel il peut poser ses questions. En second lieu, la destination possède la réponse, mais elle ne peut pas accéder à cette information. Elle n'a aucune description de sa propre structure [21].

RKRL (Radio Knowledge Representation Language), fournit un langage standard dans lequel de tels échanges de données peuvent être définis dynamiquement. Il est conçu pour être employé par des agents logiciels ayant un haut niveau de compétence conduite en partie par un grand stock de connaissances a priori.

En plus de la langue naturelle, plusieurs langages sont utilisés pour la radio (tableau 1 ci-dessous). L'Union Internationale des Télécommunications (UIT) a adopté les spécifications et le langage de description (SDL) dans ses recommandations. SDL exprime aisément l'état des machines radio, les diagrammes d'ordre de message, et les dictionnaires des données relatifs. L'Institut européen des normes de télécommunications a récemment adopté SDL en tant que l'expression normative des protocoles radio, ainsi on s'attend à ce que la modélisation SDL de

la radio continue à avancer. Cependant, SDL manque de primitives pour la connaissance générale des ontologies.

Langage	Points forts	Points faibles
SDL	État des machines, diagramme de séquence, base d'utilisateur très large, connaissances bien codées	Plan de représentation, incertitude
UML	Ontologies générales, structure, relations	Matériel, propagation RF
IDL	Interfaces, encapsulation des objets	Informatique générale
KQML	Primitives (ask/tell), sémantique	Informatique générale
KIF	Traitement axiomatique des ensembles, relations, frames, ontologies	Informatique générale, matériel, propagation RF

Tableau 1: Langages de la radio cognitive

Le langage de modélisation unifiée (UML) exprime aisément un logiciel objet, y compris des procédures, des cas d'utilisation, etc. En pratique, il a une présence forte dans la conception et le développement des logiciels, mais il est faible dans la modélisation des dispositifs câblés. En outre, bien qu'UML puisse fournir un cadre de conception pour la propagation radioélectrique, les langages cibles sont susceptibles d'être en C ou en Fortran pour l'efficacité en traçant des dizaines de milliers de rayons d'ondes radio.

Le Common Object Request Broker Architecture (CORBA) définit un langage de définition d'interface (IDL) comme une syntaxe d'exécution indépendante pour décrire des encapsulations d'objets. Ce langage est spécifiquement conçu pour déclarer les encapsulations, il manque de la puissance des langages comme le C ou Java.

Le Knowledge Query and Manipulation Language (KQML), d'autre part, était explicitement conçu pour faciliter l'échange d'une telle connaissance. Basé sur des performatives comme « tell » et « ask ». Le plan de KQML pour prendre un taxi du kiosque de l'information à « Grev Turgatan 16 » emploie la performative Tell pour indiquer le plan du réseau suivant les indications de la figure 9. Dans cet exemple, la radio avertit également le réseau que son utilisateur compose un certain email et ainsi il va avoir besoin d'une voie de transmission de données de DECT ou de la transmission radioélectrique par paquet de GSM (GPRS) en transit.

```
(Tell: language RKRL: ontology Stockholm/Europe/Global/Universe/Version 0.1
: Move_Plan (: owner User (: from Kiosk: to "Grev Turgatan 16"): distance 3522m
(: via (Taxi: probability .9) (Foot: probability 0.03))
(: PCS-needs (: DECT 32kbps) (: GSM GPRS) (: backlog Composing-email)))
```

Figure 9: Expression d'un plan en KQML

Le Knowledge Interchange Format (KIF) fournit un cadre axiomatique pour la connaissance générale comprenant des ensembles, des relations, des quantités, des unités, de la géométrie

simple, etc. Sa contribution principale est forte. Sa structure est comme celle de LIPS, mais comme IDL et KQML, il n'est pas spécifiquement conçu pour l'usage « interne ».

Le langage naturel souffre des ambiguïtés et de la complexité qui limitent actuellement son utilisation comme langage formel.

La version 0.1 de RKRL a été créée pour remplir ces vides dans la puissance expressive des langages de programmation tout en imposant une parcelle de structure sur l'utilisation du langage naturel [21].

## **I.7 Intelligence artificielle et radio cognitive**

Les techniques d'intelligence artificielle (IA) pour l'apprentissage et la prise de décision peuvent être appliquées à la conception de systèmes efficaces de la radio cognitive. Le concept de l'apprentissage automatique peut être appliqué à la radio cognitive pour la maximisation des capacités d'accès au spectre dynamique.

Le moteur de radio cognitive se compose d'une base de connaissance, d'un moteur de raisonnement et d'un moteur d'apprentissage comme illustré dans la figure 1.

La base de connaissances maintient les états du système et les actions disponibles. Le moteur de raisonnement utilise la base de connaissances pour choisir la meilleure action. Le moteur d'apprentissage effectue la manipulation des connaissances basées sur l'information observée (par exemple des informations sur la disponibilité des canaux, le taux d'erreur dans le canal).

Dans la base de connaissances, deux structures de données, à savoir, le prédicat et l'action, sont définis.

Le prédicat (règle d'inférence) est utilisé pour représenter l'état de l'environnement. Sur la base de cet état, une action peut être effectuée pour modifier l'état de telle sorte que les objectifs du système peuvent être réalisés. Par exemple, un prédicat peut être défini comme la «modulation==QPSK AND SNR == 5dB », tandis que l'action peut être définie comme «mode de modulation en baisse» avec pré-condition « $SNR \leq 8dB$  » et post-condition «modulation ==BPSK ».

Compte tenu de l'entrée (qui est obtenue à partir de la mesure), le moteur de raisonnement correspond à l'état actuel (modulation et SNR dans ce cas) avec les prédicats et détermine les résultats sous-jacents (vrai ou faux). Puis, à partir de l'ensemble des résultats des prédicats, une action appropriée est prise.

Dans l'exemple ci-dessus, si le SNR actuel est égal à 5 dB et la modulation QPSK est en cours, la pré-condition sera vraie et le prédicat sera actif. En conséquence, le moteur cognitif va décider de réduire le mode de modulation. Dans ce cas, la modulation sera modifiée pour BPSK, comme indiqué dans la post-condition correspondante.

Un algorithme d'apprentissage est utilisé pour mettre à jour à la fois l'état du système et les mesures disponibles en fonction de l'environnement radio. Cette mise à jour peut être faite en utilisant une fonction objective (par exemple, réduire le taux d'erreur binaire) avec un objectif

de déterminer la meilleure action compte tenu de l'entrée (par exemple la qualité du canal) et les connaissances disponibles. Différents algorithmes d'apprentissage peuvent être utilisés dans un réseau radio cognitif (le modèle de Markov caché, les réseaux de neurones, ou les algorithmes génétiques)[9].

### **I.7.1 Algorithmes intelligents**

Les radios cognitives doivent avoir la capacité d'apprendre et d'adapter leur transmission sans fil selon l'environnement radio ambiant. Les algorithmes intelligents tels que ceux basés sur l'apprentissage automatique, les algorithmes génétiques, et la logique floue sont donc essentiels pour la mise en œuvre de la technologie de la radio cognitive. En général, ces algorithmes sont utilisés pour observer l'état de l'environnement sans fil et de construire des connaissances sur l'environnement.

Cette connaissance est utilisée par une radio cognitive pour adapter sa décision sur le spectre d'accès. Par exemple, une radio cognitive (un utilisateur secondaire) peut observer l'activité de transmission de l'utilisateur primaire sur des canaux différents. Cela permet à la radio cognitive de développer les connaissances sur l'activité des utilisateurs primaires sur chaque canal. Cette connaissance est ensuite utilisée par la radio cognitive pour décider quelle voie d'accès choisir afin que les objectifs de performance souhaités peuvent être atteints (par exemple, le débit est maximisé alors que l'interférence ou les collisions causées aux utilisateurs primaires sont maintenues en dessous du niveau cible).

### **I.7.2 Réseaux de neurones**

Un réseau de neurones multicouches peut être utilisé pour modéliser et évaluer les performances des réseaux IEEE 802.11. Ce réseau de neurones fournit un modèle à boîte noire pour la relation non linéaire entre les entrées (paramètres réseau par exemple) et les sorties (les performances du réseau par exemple). Ce modèle de réseau de neurones peut apprendre à partir des données d'apprentissage qui peuvent être obtenues d'une manière en ligne lorsque les données de mesure en temps réel sont disponibles. Bien que l'apprentissage d'un modèle de réseau de neurones nécessite une grande quantité de ressources de calcul, le calcul de la sortie est beaucoup plus simple et il encourt seulement un léger surcoût.

Par conséquent, ce modèle est approprié pour un réseau radio cognitif pour laquelle une réponse rapide à l'évolution de l'environnement radio est exigée d'un utilisateur secondaire. Par exemple, l'utilisateur secondaire doit interrompre la transmission dès que l'activité de l'utilisateur primaire sur le même canal est détectée.

Le modèle de réseau de neurones illustré dans la figure 10 ci-dessous est composé de couches cachées et une couche de sortie.

Les entrées du modèle sont la qualité du canal, le nombre de trames reçues avec succès, le nombre de trames erronées, et la fraction du temps dans laquelle un canal est détecté. Les sorties du modèle sont le débit, le délai, et la fiabilité du réseau.

Lors de l'apprentissage de ce modèle de réseau de neurones, toutes les entrées mesurées sont utilisées pour ajuster le poids et pour minimiser l'erreur par rapport aux sorties connues. Cet

ajustement est répété jusqu'à ce que l'erreur soit inférieure à un certain seuil. Pour ajuster le poids, l'algorithme de rétro-propagation est utilisé. Les données d'apprentissage comprennent des paramètres réseau et les mesures de performance correspondantes.

Ce modèle de réseau de neurones a été évalué et il a été montré que les performances estimées obtenues à partir de ce modèle de réseau de neurones sont proches de ceux des résultats de la simulation [20].

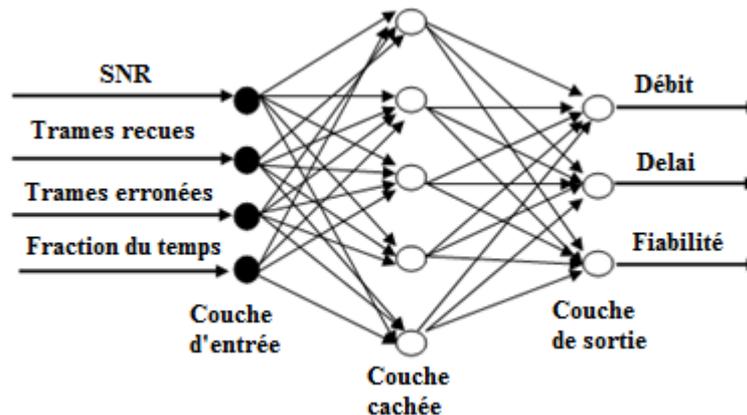


Figure 10: Réseau de neurones pour la modélisation des performances de l'IEEE 802.11

### I.7.3 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (AG) sont une partie de l'informatique évolutive, qui est un domaine en croissance rapide de l'IA. Un algorithme génétique est une technique de recherche heuristique biologiquement inspiré qui imite le processus de l'évolution naturelle; c'est une solution adaptée à des problèmes d'optimisation.

Les AG sont généralement utilisés pour développer un modèle d'inspiration biologique pour un moteur cognitive [23], ils sont également utilisés dans la RC pour résoudre le problème d'optimisation et configurer les paramètres de la RC [24] [25].

L'auteur de [26] pense que les AG sont adaptés pour des problèmes de RC car ils offrent une quantité importante de puissance et de flexibilité vu que les RC sont susceptibles de faire face à des environnements dynamiques et des mises à niveau de radio en raison de l'avancement de la technologie.

Les AG sont utilisés pour la RC pour proposer un gestionnaire de ressources cognitives pour sélectionner un algorithme à partir d'une boîte à outils pour résoudre les problèmes.

### I.7.4 Chaînes de Markov

Les approches de la théorie des jeux ne modélisent pas l'interaction entre les utilisateurs secondaires et primaires pour l'accès au spectre. Cette modélisation peut être réalisée en utilisant efficacement les chaînes de Markov [4]. Une chaîne de Markov est une suite de variables aléatoires qui permet de modéliser l'évolution dynamique d'un système aléatoire. La propriété fondamentale des chaînes de Markov est que son évolution future ne dépend du passé qu'au travers de sa valeur actuelle. Autrement, dans le cas de la RC, cette méthode ne se

contente pas du résultat seulement comme les autres méthodes mais permet également de modéliser l'interaction entre les utilisateurs (PU et SU) [27].

Peu de recherches ont été effectuées dans ce domaine [28][29], par exemple, dans [28], un modèle de Markov est présenté, où chaque SU sélectionne aléatoirement sa propre chaîne au lieu d'échanger des messages de contrôle avec les autres utilisateurs voisins. Une approche très intéressante utilisant les modèles de Markov est développée par les auteurs de [4] pour analyser les différentes politiques proposées pour le partage du spectre.

Certains travaux ont utilisé le modèle CTMC (Continuous Time Markov Chains), car il donne de bons compromis statistiques entre équité et efficacité. Les œuvres présentées dans [30][31] [32] ont utilisé CTMC pour capturer l'interaction entre PU et SU. Les deux modèles avec files d'attente et sans files d'attente sont analysées et la dégradation du débit en raison d'interférences SU est compensée.

Les auteurs de [33] utilisent les modèles de Markov cachés (HMM) pour modéliser et prédire l'occupation du spectre des bandes de radio licenciées. Ils ont proposé une technique qui permet de sélectionner dynamiquement différentes bandes avec licence pour son propre usage avec considérablement moins d'interférence. Ils pensent que par la prédiction de la durée de trous du spectre des PU, le SU peut les utiliser de manière plus efficace en quittant la bande qu'il occupe actuellement avant le début du trafic du PU. Les auteurs proposent un algorithme simple, appelé l'algorithme de prédiction de canal à base de chaînes de Markov, pour l'allocation dynamique du spectre dans les réseaux de radio cognitive.

Un framework analytique à base de files d'attente pour étudier les mesures de performance importantes rencontrées par les SU dans un réseau de RC a été développé dans [34]. Les auteurs ont étudié les statistiques des retards dans les files d'attente et les tampons des SU en modélisant l'activité du PU en tant que chaîne de Markov à deux états et le canal la variation de la qualité du SU comme une chaîne de Markov à état fini. Afin d'allouer les canaux disponibles parmi les SU, un modèle d'allocation opportuniste de canaux est considéré. Le framework proposé facilite la conception d'un contrôleur d'admission pour le SU afin de maintenir une bonne qualité de service.

Les auteurs [35] ont proposé une approche pour l'accès dynamique au spectre dans lequel l'état d'occupation de chaque bande de fréquence à chaque instant est estimé, et les bandes disponibles sont allouées en conséquence. L'estimation est effectuée à partir de mesures de puissance de densité spectrale qui sont censés obéir à un processus de Markov caché. La valeur de l'état caché représente le statut de la bande de fréquence donnée qui pourrait être libre ou occupée. Les auteurs ont formé le système en utilisant des mesures de spectre réel et l'ont testé sur des données simulées pour lesquels l'état d'occupation de chaque bande de fréquence à chaque instant est connu.

Les Modèles de Markov gèrent facilement le calcul de la probabilité d'un événement résultant d'une séquence de sous-événements. Ce type de problème ne se prête pas bien aux techniques classiques. Les modèles de Markov sont simples à générer bien qu'ils nécessitent une approche mathématique plus compliquée. Donc, il ya plusieurs problèmes avec ces modèles,

par exemple, ils font l'hypothèse markovienne que l'émission et les probabilités de transition ne dépendent que de l'état actuel, le nombre de paramètres qui doit être fixé dans un modèle de Markov est énorme et comme résultat de ce qui précède, la quantité de données nécessaire pour former un modèle de Markov est très grande.

## **I.8 Conclusion**

Les réseaux sans fil ont connu ces dernières années des développements très significatifs qui ont donné aux utilisateurs l'illusion que leurs qualités pouvaient être presque équivalentes à celles des réseaux filaires. En revanche, il apparaît également qu'une seule solution technologique, quelle qu'elle soit, ne peut pas répondre à tous les contextes d'utilisation.

Les nouvelles générations de réseaux devront apporter rapidement des solutions exploitables pour offrir la compatibilité entre les différents réseaux de façon à ce que des utilisateurs puissent passer de manière transparente d'un système à un autre.

Afin de pouvoir tirer le maximum de profit de la bande passante globale disponible, une gestion optimisée du spectre s'impose. La RC est, avant tout, un système radio qui met en place, en plus de sa fonction principale (la communication), un "cycle cognitif" qui lui permet de comprendre son contexte et d'agir en conséquence. Elle offre aux utilisateurs un débit supérieur et une meilleure qualité de service, et finalement, une augmentation du confort dans les communications.

Nous avons présenté dans ce chapitre la différence entre les réseaux sans fil et les réseaux mobiles. Nous avons ensuite présenté une technologie principale pour les futures communications sans fil qui est la radio cognitive. Nous avons donné une présentation précise et détaillée de la RC, ses principes, ses fonctions, ainsi que sa frontière avec la radio logicielle et les algorithmes intelligents utilisés dans le domaine de la radio cognitive et ses applications.

# **CHAPITRE II**

## **Synthèse sur les systèmes multi-agents**

## II. CHAPITRE II: Synthèse sur les systèmes multi-agents

### II.1 Introduction

A la différence de l'Intelligence Artificielle (IA) qui modélise le comportement intelligent d'un seul agent, l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) s'intéresse à des comportements intelligents qui résultent de l'activité coopérative de plusieurs agents.

Les systèmes d'IAD peuvent être définis comme étant des systèmes coopératifs où un ensemble d'agents peut agir en même temps pour résoudre un problème donné. Dans ces systèmes, le contrôle et l'information sont souvent distribués à travers les différents agents. Ceci réduit la complexité de chaque agent et leur permet de travailler en parallèle et ainsi augmenter la vitesse de résolution. Une des caractéristiques principales de ce genre de systèmes est qu'ils continuent de fonctionner même si quelques agents cessent d'opérer.

La résolution coopérative de problèmes prend une place prépondérante dans les recherches en IAD. Un domaine de recherche relativement complexe, dérivé de l'IAD, est celui des Systèmes Multi-agents (SMA). La thématique SMA se focalise sur l'étude des comportements collectifs et sur la répartition de l'intelligence sur des agents plus ou moins autonomes, capables de s'organiser et d'interagir pour résoudre des problèmes.

L'application des SMA dans la RC est très prometteuse, en effet elle est utilisée dans la mise en œuvre de l'architecture des réseaux RC. Ces derniers doivent pouvoir coexister pour rendre les systèmes de la RC pratiques, ce qui peut générer des interférences aux autres utilisateurs. Afin de traiter ce problème, l'idée de la coopération entre les utilisateurs pour détecter et partager le spectre sans causer d'interférences est mise en place.

Dans ce chapitre, nous commençons par définir les notions d'agents et de systèmes multi-agents, nous donnons quelques avantages de SMA qui font que les chercheurs choisissent cette méthode pour la résolution de leur problème. Nous avons ensuite étudié en détail l'approche voyelles (AEIO) de Demazeau [36] en passant par la notion d'Agent, d'Environnement, d'Interaction et d'Organisation. Après cela, nous avons fait une synthèse sur les différentes techniques de négociation qui existent ainsi qu'un état de l'art détaillé sur l'utilisation des SMA dans la RC.

### II.2 Systèmes multi-agents

Les Systèmes multi-agent sont apparus au carrefour des recherches sur l'IAD et sur la vie artificielle. Les SMA sont particulièrement adaptés pour proposer des solutions réactives et robustes à des problèmes complexes pour lesquels il n'existe pas de contrôle centralisé [37]. En effet, un SMA est un regroupement d'agent où chaque agent possédant une ou plusieurs compétences élémentaires. Le but est de faire travailler ensemble les agents pour résoudre un problème ou effectuer une tâche spécifique. En quelque sorte, on distribue l'intelligence, chaque agent autonome n'ayant qu'une vision locale du problème ou une tâche élémentaire d'un travail à effectuer.

Ferber [38] définit un SMA de la manière suivante :

« Un système Multi-agents est un système composé des éléments suivants :

Un **environnement** est un espace disposant généralement d'une métrique.

Un ensemble d'**objets** situés dans l'espace, ils sont passifs, ils peuvent être perçus, détruits, créés et modifiés par les agents.

Un ensemble d'**agents** qui sont les entités actives du système.

Un ensemble de **relations** qui unissent les objets entre eux.

Un ensemble d'**opérations** permettant aux agents de percevoir, de détruire, de créer, de transformer et de manipuler les objets.

Un ensemble d'**opérateurs** chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification (les lois de l'univers).»

### II.2.1 Quand et Pourquoi opter pour les SMA

Les SMA sont utilisés en général lorsque le problème est trop complexe pour être résolu par un seul système à cause de quelques limitations logicielles ou matérielles. En particulier, si les composantes entretiennent des relations multiples entre elles. Les SMA représentent un excellent outil pour assurer un contrôle autonome dans un système largement distribué et dont les caractéristiques sont très dynamiques.

Pour qu'un SMA soit efficace, il faut que plusieurs agents travaillent en même temps, ce qui réduit le temps de résolution vu la vitesse utilisée qui est due principalement au parallélisme.

Quand on a besoin d'un système qui doit s'adapter dynamiquement lorsqu'on ajoute ou on retire de nouvelles composantes et que ses dernières doivent s'adapter facilement quand l'environnement subit des modifications, les SMA sont sûrement la solution idéale pour ce genre de scénarios. Il ne faut pas oublier que l'un des plus importants avantages des SMA est leur modularité qui permet de rendre la programmation plus simple, c'est-à-dire que l'ajout de nouveaux agents à un SMA ne pose aucun problème ce qui explique leur extensibilité.

L'intérêt de la solution à base d'agents réside dans l'absence totale d'entité centrale régissant le fonctionnement des agents, ce qui garantit une grande résistance et une grande fiabilité (car si un agent tombe en panne, le système continue de fonctionner).

Nous avons dans un premier temps étudié en détail l'approche voyelles (AEIO) de Demazeau [36]. L'approche (A, E, I, O) utilise 4 dimensions pour analyser et concevoir un SMA:

**Agent** : Éléments pour définir les entités agissantes.

**Environnement** : Éléments pour structurer les interactions avec les entités externes communes.

**Interaction** : Eléments pour structurer les interactions entre les agents.

**Organisation** : Eléments pour structurer les agents.

### II.3 Agent

Le concept d'agent est utilisé dans plusieurs disciplines, ce qui fait que peu de compromis existent lorsqu'il s'agit de définir le terme « agent », en général, la définition diffère selon le type d'application et le comportement de l'agent.

Toutefois, une des définitions les plus connues et qui est considérée comme l'une des premières est celle de [38] :

« Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents. »

Lorsqu'on parle d'agents, on parle souvent de quelques propriétés telles que l'autonomie (l'agent est capable d'agir tout seul, sans l'intervention d'un tiers), de pro activité (peut prendre des initiatives pour satisfaire ses buts), flexibilité (adapte son comportement à sa perception de son environnement) et de communication (avec les autres agents).

#### II.3.1 Caractéristiques des agents

En partant de l'ouvrage de Wooldrige et Jennings [39] et des définitions citées, on peut identifier les caractéristiques suivantes pour la notion d'agent:

**Situé:** l'agent est capable d'agir sur son environnement à partir des entrées sensorielles qu'il reçoit de ce même environnement;

**Autonome:** un agent autonome est indépendant de l'utilisateur et des autres agents. Il peut spontanément effectuer certaines tâches et peut prendre des initiatives sans l'intervention d'un tiers. Un agent autonome doit savoir comment accomplir ses buts en fonction de l'état de son environnement ou doit être capable de trouver un moyen pour accomplir ses buts [40].

**Proactive:** les agents n'agissent pas simplement en réponse à leur environnement, ils sont capables d'exposer un comportement dirigé but en prenant l'initiative. L'agent doit exhiber un comportement proactif et opportuniste, tout en étant capable de prendre l'initiative au bon moment;

**Réactive:** un agent devrait pouvoir percevoir son environnement, élaborer une réponse dans le temps requis et réagir à ses changements, que ce soit la modification des objectifs de l'utilisateur ou des ressources disponibles.

**Social:** l'agent doit être capable d'interagir avec d'autres agents (logiciels ou humains) afin d'accomplir des tâches ou aider ces agents à accomplir les leurs.

### II.3.2 Typologie des agents

Il existe deux types d'agents dans les SMA [41]:

- Agents réactifs: des entités très simples réagissant directement aux modifications de l'environnement (stimuli réponses).
- Agents cognitifs : des agents intelligents au comportement plus « réfléchi », c'est-à-dire résultant d'un choix parmi un ensemble d'actions possibles, ce choix étant le résultat d'un raisonnement.

Un autre type d'agents appelé agent hybride apportant une réponse aux imperfections des deux types précédents a été proposé ensuite dans la littérature.

#### *a Agents réactifs*

Les agents réactifs ont un comportement du type « stimulus – réponse ». L'agent réactif ne possède pas une représentation complète de son environnement et n'est pas capable de tenir compte de ses actions passées. De ce fait, un agent réactif est extrêmement simple. Il dispose d'un processus de raisonnement procédural, d'un protocole et d'un langage de communication réduit [42].

Les agents réactifs ne sont pas "intelligents" pris individuellement. Cependant, du fait, de leur nombre, ces agents réactifs peuvent résoudre des problèmes qualifiés de complexes. Les systèmes multi-agents constitués uniquement d'agents réactifs possèdent un grand nombre d'agents. La convergence du comportement de l'ensemble des agents vers un état décisionnel stable n'est pas forcément assurée, et si un état stable est atteint, il n'est pas sur qu'il s'agisse de la solution optimale.

La structure des agents purement réactifs tend à la simplicité, mais ces derniers peuvent être capables d'actions de groupe complexes et coordonnées. C'est le cas d'une société de fourmis, dont la somme des membres est capable d'actions évoluées mais dont chaque individu pris séparément possède une représentation faible de l'environnement et n'a pas de buts globaux. Les activités complexes et tournées vers un but sont dans cette architecture d'agents une propriété émergente des interactions sociales entre les agents constituant le groupe.

#### *b Agents cognitifs*

Les agents cognitifs sont plus évolués. Ils sont le résultat direct des recherches menées dans le domaine de l'intelligence artificielle. Les agents cognitifs ont une représentation globale de leur environnement et des autres agents avec lesquels ils communiquent. Ils savent tenir compte de leur passé et s'organisent autour d'un mode social d'organisation.

Les agents cognitifs disposent d'une base de connaissances comprenant les diverses informations liées à leurs domaines d'expertise et à la gestion des interactions avec les autres agents et leur environnement. Les agents sont généralement "intentionnels" c'est à dire qu'ils possèdent des buts et des plans explicites leur permettant d'accomplir leurs buts [38].

Les systèmes multi-agents constitués uniquement d'agents cognitifs sont constitués d'un nombre d'agents assez faible. Ils réclament des ressources plus importantes que les systèmes

d'agents réactifs. La convergence du système vers un état décisionnel stable n'est pas non plus assurée par l'utilisation de ce type d'agents, mais ils permettent de résoudre des problèmes plus complexe et nécessitant une plus grande abstraction [43].

Le tableau 2 ci-dessous établit la différence entre les agents cognitifs et les agents réactifs. La liste des caractéristiques n'est pas exhaustive [42].

Caractéristiques	Agent cognitif	Agent réactif
Capacité de raisonnement	Elevé	Faible
Représentation explicite de l'environnement	Oui	Non
Nombre d'agents	Grand	Petit
Structure	Complexe	Stimulus/Action
Temps de réponse	Lent	Rapide

Tableau 2: Comparatif entre agent cognitif et agent réactif

### *c Agents hybrides*

Les types d'agents précédents présentent certaines faiblesses. En effet, les agents purement réactifs ont un comportement assez simpliste alors que les agents cognitifs utilisent des mécanismes de raisonnement qui ne sont pas faciles à manipuler et qui ne sont pas suffisamment réactifs. Afin d'apporter une réponse à ces imperfections, des architectures hybrides en couches ont été proposées [44].

### II.3.3 Architecture des agents

C'est la description de son organisation interne, les données et les connaissances de l'agent, les opérations qui peuvent être effectuées sur ses composantes, et le flux de contrôle des opérations. Le choix d'une architecture ou d'une autre est lié à la structure conceptuelle de l'agent.

Agent réactifs ———→ architecture de subsomption.

Agent cognitifs ———→ architecture BDI

Agent hybrides ———→ architecture InterRap.

#### *a Architecture réactive*

Les architectures réactives, dites aussi comportementales, se caractérisent par des agents qui ont la capacité de réagir rapidement à des problèmes simples, qui ne nécessitent pas un haut niveau de raisonnement. Ce type d'architectures ne nécessite aucune représentation symbolique de l'environnement réel. En fait, les agents réactifs réagissent aux changements de leur environnement ou aux messages provenant des autres agents. Dans un système à base d'agents réactifs, l'intelligence émerge de l'interaction des agents avec leur environnement. L'inconvénient majeur de ce type d'architectures est l'absence de formalisme, ce qui ne facilite pas la compréhension et la prédiction du comportement des agents, et la quasi- impossibilité de vérifier leur cours d'action.

L'architecture réactive la plus connue et la plus influente est celle proposée par Rodney Brooks ; elle s'appelle **architecture de subsomption**, en anglais "subsumption architecture".

Une architecture de subsomption comporte plusieurs modules, chaque module étant responsable de la réalisation d'une tâche simple. Ces modules correspondent à des comportements spécifiques pour accomplir une tâche particulière, et s'appellent **modules de compétence**. On peut voir cette architecture, dans un premier temps, comme ayant la structure des agents réactifs, où l'agent a plusieurs composantes de décision, chaque composante correspondant à un module de l'architecture de subsomption. Pour la perception de l'environnement, plusieurs modules peuvent assumer l'exécution d'une action différente ; pour choisir l'action la plus opportune, les modules sont organisés en couches hiérarchisées, chaque couche ayant une priorité différente. Les couches supérieures correspondent à des tâches plus abstraites qui sont détaillées à l'aide des tâches plus concrètes et plus simples, les couches supérieures ayant une priorité plus petite que les couches inférieures. Les couches inférieures correspondent aux tâches simples et elles ont une priorité plus grande. La figure 11 montre une telle architecture.

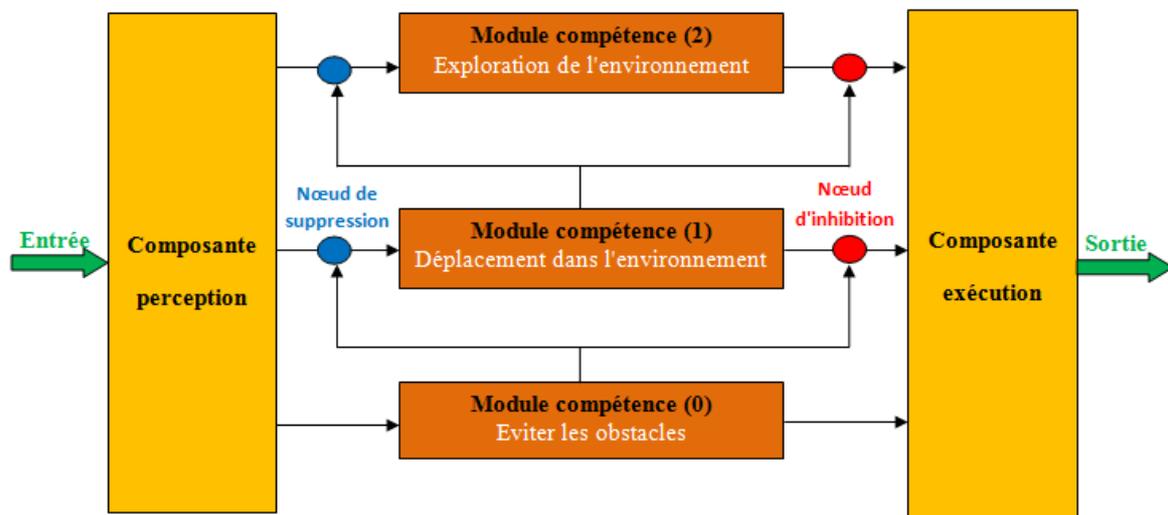


Figure 11: Architecture réactive de subsomption

### *b Architecture cognitive*

L'architecture d'agents cognitifs la plus importante est l'architecture BDI (Belief, Desire, Intention). L'idée de base de l'approche est de décrire l'état interne d'un agent en termes d'attitudes mentales et de définir une architecture de contrôle grâce à laquelle l'agent peut sélectionner le cours d'action de ses attitudes mentales [38] :

**Croyances (Beliefs):** Les croyances d'un agent sont les informations que l'agent possède sur l'environnement et sur d'autres agents qui existent dans le même environnement. Les croyances peuvent être incorrectes, incomplètes ou incertaines et, à cause de cela, elles sont différentes des connaissances de l'agent, qui sont des informations toujours vraies. Les croyances peuvent changer au fur et à mesure que l'agent, par sa capacité de perception ou par l'interaction avec d'autres agents, recueille plus d'information.

Désirs (**D**esires): Les désirs d'un agent représentent les états de l'environnement, et parfois de lui-même, que l'agent aimerait voir réalisés. Un agent peut avoir des désirs contradictoires ; dans ce cas, il doit choisir parmi ses désirs un sous-ensemble qui soit consistant.

Intentions (**I**ntentions): Les intentions d'un agent sont les désirs que l'agent a décidé d'accomplir ou les actions qu'il a décidé de faire pour accomplir ses désirs. Même si tous les désirs d'un agent sont consistants, l'agent peut ne pas être capable d'accomplir tous ses désirs à la fois.

La figure 12 présente les composantes principales d'une architecture BDI.

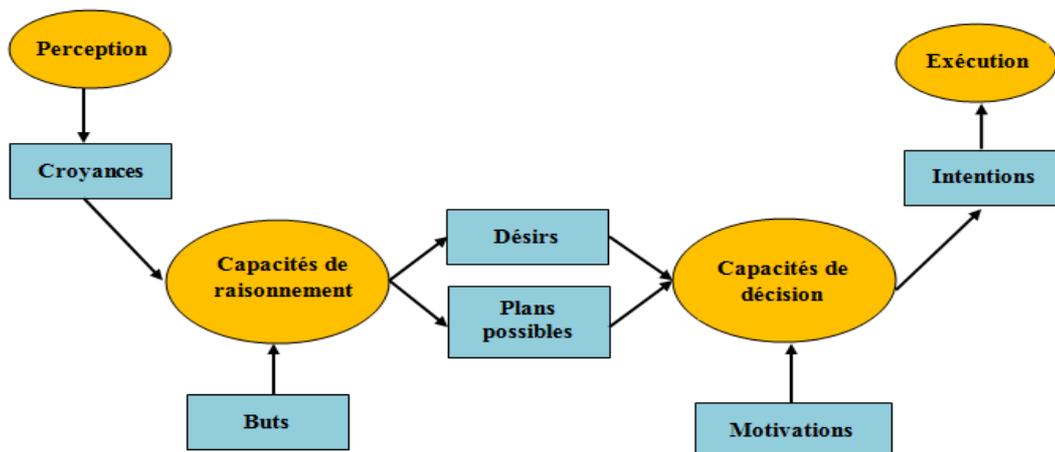


Figure 12: Architecture BDI d'un agent

L'agent perçoit son environnement: cette perception est utilisée pour mettre à jour un ensemble de croyances. Cet agent est muni de buts explicites, ce qui lui confère son autonomie. Ses capacités de raisonnement lui permettent de raisonner sur ses connaissances et ses buts pour en déduire des plans d'actions possibles qui décrivent des alternatives d'actions que l'agent peut mettre en œuvre de façon à satisfaire ses buts.

Les désirs sont issus du caractère partiel des plans possibles, les motivations sont l'expression symbolique ou numérique des préférences qui serviront de critères pour choisir entre les différents plans possibles.

Les capacités de décision de l'agent vont donc appliquer les critères de préférences pour sélectionner parmi les alternatives possibles, le plan qui semble le meilleur. Les intentions sont donc l'expression du plan choisi et qui seront exécutés finalement sous forme d'actions sur l'environnement ou sur les autres agents via des langages de communication.

### *c Architecture hybride*

Une architecture hybride d'un agent intelligent est une architecture composée d'un ensemble de modules organisés dans une hiérarchie, chaque module étant soit une composante cognitive avec représentation symbolique des connaissances et capacités de raisonnement, soit une composante réactive. De cette manière, on combine le comportement proactif de l'agent,

dirigé par les buts, avec un comportement réactif aux changements de l'environnement. En plus, on espère obtenir simultanément les avantages des architectures cognitives et réactives, tout en éliminant leurs limitations.

Plusieurs architectures hybrides ont été conçues et utilisées. Une des architectures hybrides les plus connues est celle du système InteRRaP (Integration of Reactive Behavior and Rational Planning).

Un agent InteRRaP est un agent BDI qui a des buts à atteindre (les buts sont les mêmes que les désirs) et qui est capable de coopérer avec d'autres agents InteRRaP pour accomplir ces buts.

Il est intéressant d'observer que, dans cette conception, la réactivité de l'agent est conçue toujours comme un but, c'est-à-dire au niveau cognitif, mais comme un but très simple à réaliser.

L'architecture InteRRaP est composée de trois couches de contrôle et trois bases de connaissances associées qui représentent l'agent et l'environnement à divers niveaux d'abstraction, comme il est indiqué dans la figure 13.

Chaque couche a un ensemble d'opérations spécifiques associées et une couche supérieure utilise les opérations plus simples de la couche d'au-dessus pour exécuter ses opérations plus élaborées. Le flux de contrôle passe de bas en haut, et une couche prend le contrôle lorsque la couche antérieure ne peut plus contribuer, par ses opérations, à l'accomplissement des buts.

Chaque couche comprend deux modules: un module pour l'activation des buts et la reconnaissance des situations (**AR**) et un module de planification et d'exécution (**PE**). Les perceptions sur l'environnement sont transmises au module **AR** de la première couche et, de module en module, vers le sommet de la hiérarchie. Le flux de contrôle des actions passe de haut en bas pour arriver à la fin au module **PE** de la dernière couche, et les actions associées sont exécutées sur l'environnement.

La base de connaissances **BC-Monde** représente l'information que l'agent possède sur l'environnement (croyances sur l'environnement), la base de connaissances **BC-Planification** est équivalente à la bibliothèque des plans d'une architecture BDI ; enfin, **BC-Sociale** représente les croyances de l'agent sur les autres agents du système, et notamment leurs capacités de l'aider à atteindre ses buts.

Les architectures hybrides se sont avérées efficaces dans beaucoup d'applications. Il y a cependant deux reproches qu'on peut leur faire : il n'y a pas de modèle formel associé comme dans le cas d'une architecture BDI pure, et on n'a pas encore validé de véritable méthodologie pour guider l'utilisateur dans la conception d'applications utilisant de telles architectures [45].

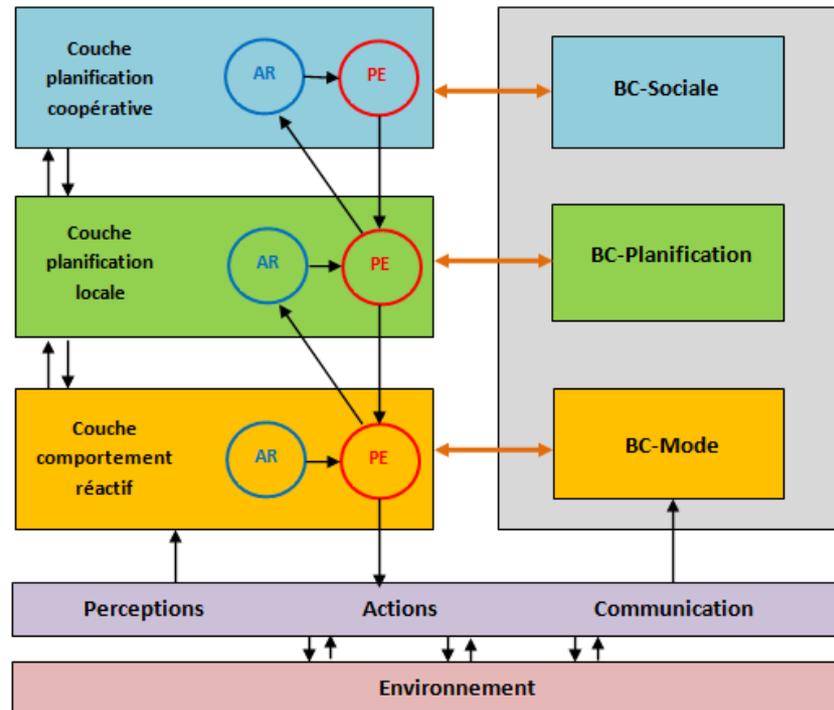


Figure 13: Architecture InteRRaP

## II.4 Environnement

Un agent ne peut exister sans environnement. L'environnement est une structure dans laquelle l'agent évolue. Un agent va agir sur son environnement et l'environnement va agir sur l'agent.

L'environnement est un élément important dans le processus dynamique d'un système multi-agents. C'est la fusion entre le contexte de déploiement (entités externes et ressources avec lesquelles le SMA interagit) et l'environnement d'application.

Un environnement peut être vu comme un état  $e$  parmi un ensemble d'états  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ .

L'agent perçoit son environnement à l'aide des capteurs, choisit la ou les actions à faire selon sa fonction interne et exécute ces actions dans l'environnement à l'aide de ses effecteurs.

Les propriétés de l'environnement influencent la façon dont on conçoit un agent car il faut tenir compte de l'évolution de l'environnement, de la capacité de l'agent de saisir cette évolution et de sa capacité à décider en conséquence. Par exemple, si on a plusieurs agents qui agissent dans un même environnement, chaque agent va percevoir l'environnement comme dynamique et non déterministe, car l'état de l'environnement changera en raison des actions des autres agents, et une même action exécutée dans un certain état aura des résultats différents en fonction des actions de ces autres agents.

### II.4.1 Propriétés de l'environnement

Dans ce qui suit, nous présentons une classification des différentes propriétés de l'environnement d'un SMA telles que les ont suggérées Russel et Norvig [46]: ils suggèrent de présenter chaque propriété en opposant ses deux extrêmes:

**Accessible ou inaccessible:** Un environnement est accessible si l'agent peut percevoir entièrement l'état de l'environnement ou, au moins, tous les traits de l'environnement qui sont significatifs du point de vue des actions de l'agent. Un environnement est dit accessible si l'agent peut obtenir une information complète et exacte. Sinon, l'environnement est inaccessible.

**Déterministe ou indéterministe:** Un environnement déterministe est un environnement dans lequel n'importe quelle action a un seul effet garanti: il n'y a aucune incertitude quant à l'état qui résultera de l'application d'une action. Si l'état suivant de l'environnement est déterminé d'une manière unique par l'état courant et l'action de l'agent, alors l'environnement est déterministe. Si le résultat est incertain, notamment si, par suite d'une action de l'agent, l'environnement peut évoluer de différentes manières, alors on est dans le cas non déterministe. Les environnements non déterministes posent plus de problèmes pour le concepteur du système.

**Épisodique ou non épisodique:** Dans un environnement épisodique, la performance d'un agent est dépendante d'un nombre d'épisodes discrets, sans lien entre les performances d'un agent dans des scénarios différents. Les environnements épisodiques sont plus simples du point de vue du développeur d'agents parce que l'agent peut décider quelle action appliquer en se basant seulement sur l'épisode courant, il n'a pas besoin d'interaction entre l'épisode courant et les épisodes à venir.

**Statique ou dynamique:** Un environnement statique est un environnement qui ne risque de changer d'état que lors de l'application d'actions par l'agent. Un environnement dynamique est un environnement qui a d'autres processus agissant dessus et qui risque de subir des changements à l'instar du contrôle de l'agent. Si l'environnement ne peut pas changer d'état sans l'intervention de l'agent, on est dans le cas statique. L'environnement est dynamique si son état peut se modifier sans l'action de l'agent dans l'intervalle de temps entre deux perceptions de l'agent.

**Discret ou continu:** Un environnement est discret s'il comporte un nombre fixe et fini d'actions et de perceptions possibles. Russel et Norvig donnent un jeu d'échec comme exemple d'environnement discret et la conduite d'un taxi comme exemple d'environnement continu. Si tout passage d'un état de l'environnement à un autre nécessite le passage par une séquence d'états intermédiaires, alors on a un environnement continu ; sinon, l'environnement est discret.

Intuitivement, les classes les plus complexes d'environnements sont ceux qui sont inaccessibles, indéterministes, non-épisodiques, dynamiques et continus.

## II.5 Interactions entre agents

L'interaction est le composant de base de toute organisation, à la fois source et produit de la permanence de cette organisation, et la dissolution d'une organisation est concomitante de la disparition (ou en tout cas de la diminution) des interactions des individus présents dans cette organisation.

Une des principales propriétés de l'agent dans un SMA est celle d'interagir avec les autres agents. Ces interactions sont généralement définies comme toute forme d'action exécutée au sein du système d'agents et qui a pour effet de modifier le comportement d'un autre agent.

Une interaction est une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques. Les interactions s'expriment ainsi à partir d'une série d'actions dont les conséquences exercent en retour une influence sur le comportement futur des agents [38].

L'interaction peut être décomposée en trois phases non nécessairement séquentielles:

La réception d'information ou la perception d'un changement,

Le raisonnement sur les autres agents à partir des informations acquises,

Une émission de messages ou plusieurs actions (plan d'actions) modifiant l'environnement.

Après avoir considéré les interactions vis-à-vis de l'environnement, il reste aux agents la possibilité de communiquer entre eux. Il peut y avoir plusieurs objectifs liés aux actes de communication entre agents. Les interactions inter-agents et la manière dont celles-ci sont organisées permettent aux agents de se coordonner, de coopérer ou encore de négocier. La coordination est un point essentiel, surtout vis-à-vis d'une implémentation informatique du modèle multi-agents.

*Les types courants d'interaction incluent la **coopération** (travailler ensemble à la résolution d'un but commun); la **coordination** (organiser la résolution d'un problème de telle sorte que les interactions nuisibles soient évitées ou que les interactions bénéfiques soient exploitées); et la **négociation** (parvenir à un accord acceptable pour toutes les parties concernées).*

Ferber [38] a pu faire une typologie des situations d'interactions à travers les principales composantes de l'interaction (buts, ressources, compétences). Les interactions des agents d'un SMA sont motivées par l'interdépendance des agents selon ces trois dimensions: leurs buts peuvent être compatibles ou non; les agents peuvent désirer des ressources que les autres possèdent; un agent X peut disposer d'une capacité nécessaire à un agent Y pour l'accomplissement d'un des plans d'action de Y. Le tableau 3 ci-dessous récapitule les différentes situations possibles.

Buts	Ressources	Compétences	Types de situation	Remarques
<b>Compatibles</b>	Suffisantes	Suffisantes	Indépendance	Situation d'indifférence
		Insuffisantes	Collaboration simple	Situation de coopération
<b>Compatibles</b>	Insuffisantes	Suffisantes	Encombrement	
		Insuffisantes	Collaboration coordonnée	
<b>Incompatibles</b>	Suffisantes	Suffisantes	Compétition individuelle pure	Situation d'antagonismes
		Insuffisantes	Compétition collective pure	
<b>Incompatibles</b>	Insuffisantes	Suffisantes	Conflits individuels pour des ressources	
		Insuffisantes	Conflits collectifs pour des ressources	

Tableau 3: Classification des situations d'interaction

D'après Ferber, les buts sont incompatibles si la satisfaction de l'un entraîne l'insatisfaction de l'autre.

### II.5.1 Coopération entre agents

S'ils sont en coopération, alors le but des agents n'est plus seulement de maximiser sa propre satisfaction mais aussi de contribuer à la réussite du groupe. Les agents travaillent ensemble à la résolution d'un problème commun.

On peut considérer la coopération comme une attitude adoptée par les agents qui décident de travailler ensemble ou on peut adopter le point de vue d'un observateur extérieur au SMA qui interprète a posteriori les comportements des agents pour les qualifier de coopératifs ou non suivant des critères préétablis tels que l'interdépendance des actions ou le nombre de communications effectuées [38].

### II.5.2 Coordination entre agents

La coordination est une question centrale pour les SMA et la résolution de systèmes distribués. En effet, sans coordination un groupe d'agents peut dégénérer rapidement en une collection chaotique d'individus. On pourrait penser que la façon la plus simple d'assurer un comportement cohérent du groupe d'agents serait de le faire par un agent centralisateur qui

détiendrait des informations de haut niveau sur ces agents. Ainsi, l'agent centralisateur pourrait créer des plans d'action et assigner les tâches aux divers agents du groupe. Cette approche est pratiquement impossible à mettre en œuvre dans des applications réalistes en raison de la difficulté de réaliser un tel agent centralisateur qui puisse tenir compte des buts, des connaissances et des activités de chaque agent, sans compter qu'on perdrait les avantages d'un SMA composé d'agents autonomes [45].

On distingue deux composantes fondamentales de la coordination entre agents, ce sont:

**L'allocation de ressources rares:** pour l'allocation des ressources partagées, les agents doivent être capables de faire des transferts de ressources.

**La communication de résultats intermédiaires:** les agents doivent être capables de communiquer entre eux de façons à pouvoir échanger les résultats intermédiaires.

### II.5.3 Négociation entre agents

La négociation joue un rôle fondamental dans les activités de coopération en permettant aux personnes de résoudre des conflits qui pourraient mettre en péril des comportements coopératifs. En général les chercheurs en IAD utilisent la négociation comme un mécanisme pour coordonner un groupe d'agents.

Dans le cas des SMA, la négociation est une composante de base de l'interaction surtout parce que les agents sont autonomes; il n'y a pas de solution imposée à l'avance et les agents doivent arriver à trouver des solutions dynamiquement, pendant qu'ils résolvent les problèmes.

Le choix du protocole de négociation est très important, surtout parce qu'un protocole ou un autre peut imposer un certain comportement (préférable) aux agents. Le nombre de participants et les interactions possibles peuvent varier: négociation un-à-un, négociation un-à-plusieurs, négociation plusieurs-à-plusieurs.

### II.5.4 Communication entre agents

Les agents peuvent interagir soit en accomplissant des actions linguistiques (en communiquant entre eux), soit en accomplissant des actions non-linguistiques qui modifient leur environnement. En communiquant, les agents peuvent échanger des informations et coordonner leurs activités.

Pour qu'un agent puisse interagir avec d'autres agents et réagir à son environnement, il a besoin de langage de communication entre agents. Pour que ceci soit possible, les agents ont besoin d'un langage commun de communication qui, davantage est concerné par l'échange de l'information que son contenu. Dans les systèmes multi-agents deux stratégies principales ont été utilisées pour supporter la communication entre agents :

Envoi de message : les agents peuvent échanger des messages directement

Partage de ressources : les agents peuvent accéder à une base de données partagée dans laquelle les informations sont postées.

La communication est généralement basée sur les 3 éléments suivants:

**Protocole d'interaction:** ceci se rapporte à la stratégie de niveau élevé poursuivi par les agents logiciels qui interagissent avec d'autres agents.

**Protocole de transport:** c'est le mécanisme réel de transport utilisé pour la communication en utilisant le langage de communication.

**Langage de communication:** c'est le médium par lequel les attitudes concernant le contenu du message échangé sont communiquées.

#### *a Protocole d'interaction entre agents*

L'interaction entre agent exige un ensemble de messages convenus, de règles pour des actions basées sur la réception de divers messages, et d'acceptations des voies de transmission [47]. Ces contraintes, règles et modèles peuvent être soustraits et formalisés comme AIP (Agent Interaction Protocol), qui font la base de la négociation et de la coopération d'agents. En utilisant les protocoles, les comportements autonomes des agents peuvent être de façon ou d'autre prévisibles. L'AIP sont des modèles représentant les messages de communication et les contraintes correspondantes sur le contenu de tels messages.

#### *b Transport de messages*

La communication entre agents est nécessaire aussi bien pour échanger les données entre les agents que les connaissances. Pour cela, plusieurs moyens existent : au niveau le plus bas, il existe des *sockets* qui permettent aux différents agents codés en Java de communiquer entre eux ; il existe aussi d'autres technologies (en Java notamment). On peut citer l'invocation de méthodes distantes (RMI pour Remote Method Invocation) et la technologie CORBA (Common Request Broker Architecture).

#### *c Langages de communication entre agents*

L'ACL (Agent Communication Language) a été créé pour assurer l'interopérabilité entre des agents autonomes et distribués. L'ACL a trois composants : un vocabulaire, un langage de communication entre agent et un langage spécifiant le contenu appelé KIF (Knowledge Interchange Format).

Ci-dessous, une définition des deux ACL les plus connus actuellement: KQML et FIPA-ACL.

**KQML** (Knowledge Query and Manipulation Language) est issu d'un projet de la DARPA [48]. C'est un langage qui vise à définir un ensemble d'actes de langage qui soient standards et utiles. Ces actes de langages, appelés aussi performatives, sont utilisés par les agents pour échanger des informations. Un message est divisé en trois couches : La couche communication, La couche message et la couche contenu. KQML fournit la couche linguistique pour rendre la communication efficace en considérant le contexte des messages. Il a été conçu comme format de message et comme protocole qui permet l'identification, le raccordement et l'échange de l'information entre des programmes.

**FIPA-ACL** a été créé par l'organisme international FIPA (Foundation for Physical Intelligent Agents) avec le but de créer un langage de communication agent standard. FIPA-ACL a également été conçu pour palier aux faiblesses des différentes versions de KQML. Tout comme KQML, FIPA-ACL se base sur la théorie des actes du langage et la structure de ses

messages est similaire à celle des messages KQML. FIPA-ACL diffère de KQML en ce qu'il a été directement doté d'une sémantique. En effet, la version originale de KQML ne décrivait que la syntaxe de ses messages et rien n'était dit sur leur sens précis. Ce n'est que plus tard, qu'une sémantique a été proposée pour KQML.

## II.6 Organisation des agents

Une organisation est la façon dont le groupe est constitué pour pouvoir travailler. L'organisation décrit l'ensemble des composants, leur nature, leurs responsabilités, leurs besoins en ressource (processeurs) et leurs liens de communication ou d'arrangement. Nous allons présenter ici les différents types d'organisation d'agents qui existent [49]:

**Hiérarchies:** les agents sont hiérarchisés selon la structure d'un arbre, dans lequel chaque nœud représente un agent, et possède un lien d'autorité sur ses nœuds-fils. Ce modèle permet de décomposer la tâche globale du système.

**Holarchies:** L'holarchie se rapproche de la hiérarchie, mais il existe quand même une différence majeure. En effet, il n'y a pas de relation d'autorité entre un agent et son sous-groupe, mais les agents du sous-groupe constituent "physiquement" leur sur-agent.

**Coalitions:** Une coalition est une alliance temporaire d'agents qui s'unissent et collaborent car leurs intérêts individuels se rencontrent. La valeur de la coalition doit être supérieure à la somme des valeurs individuelles des agents la composant.

**Équipes:** Les agents constituant l'équipe travaillent ensemble à la réalisation d'objectifs communs. À la différence des agents d'une coalition, les agents d'une équipe cherchent à maximiser les intérêts de l'équipe plutôt que leurs intérêts personnels.

**Congrégations:** Les congrégations sont assez similaires aux coalitions et aux équipes. Cependant, elles sont destinées à être permanentes et ont généralement plusieurs objectifs à réaliser. De plus, les agents peuvent entrer et sortir des congrégations, et appartenir à plusieurs congrégations en même temps.

**Sociétés:** La société est un ensemble d'agents variés, qui interagissent et communiquent. Ils possèdent différents objectifs, n'ont pas le même niveau de rationalité, ni les mêmes capacités, mais sont tous soumis à des lois communes (normes).

**Fédérations:** Les agents d'une fédération cèdent une partie de leur autonomie au délégué de leur groupe. Les agents d'un groupe n'interagissent qu'avec leur délégué, qui lui-même interagit avec les délégués des autres groupes.

**Marchés:** Des agents vendeurs proposent des objets à la vente, sur lesquels des agents acheteurs peuvent enchérir. Ce genre d'organisation permet, par exemple, de simuler des marchés réels et/ou de comparer différentes stratégies de négociation.

**Matrices:** Les agents d'une organisation en matrices sont hiérarchisés. Cependant, à la différence de la hiérarchie présentée plus haut, où un agent n'était soumis qu'à l'autorité d'au

plus un seul autre agent, les agents dans une organisation matricielle peuvent être soumis à plusieurs autres agents.

**Combinaisons:** Une organisation combinée mélange plusieurs styles présentés ci-dessus (ou d'autres qui auraient été oubliés dans cette liste). Cela peut être, par exemple, une fédération de coalitions ou une hiérarchie d'équipes.

## II.7 Techniques de négociation

Un protocole de négociation est l'ensemble de règles qui dirigent l'interaction. Ceci inclut les types de participants permis, les états de la négociation, les événements qui font passer d'un état à un autre et les actions valides et acceptables de la part des participants. Dans la littérature, il existe plusieurs protocoles de négociation; dans ce qui suit nous allons aborder uniquement les plus importants :

### II.7.1 Contract Net

Le **Contract-Net** est un protocole permettant l'élaboration et l'exécution d'un contrat entre un agent *manager* et un agent *contractant*. Il fait intervenir des agents interagissant entre eux pendant l'élaboration et l'exécution du contrat au moyen de performatifs[50].

Le protocole réseau contractuel (Contract Net) a été une des premières approches utilisées dans les SMA pour résoudre le problème d'allocation des tâches [51]. Les agents coordonnent leurs activités grâce à l'établissement de contrats pour atteindre des buts spécifiques. Dans le protocole réseau contractuel, les agents peuvent prendre deux rôles: gestionnaire et contractant.

Un agent, agissant comme un gestionnaire ("manager") décompose son contrat (une tâche ou un problème) en sous-contrats qui pourront être traités par des agents contractants potentiels. Le gestionnaire annonce chaque sous contrat sur un réseau d'agents (les contractants). Les agents reçoivent et évaluent l'annonce. Les agents qui ont les ressources appropriées, l'expertise ou l'information requise envoient au gestionnaire des soumissions ("bids") qui indiquent leurs capacités à réaliser la tâche annoncée. Le gestionnaire évalue les soumissions et accorde les tâches aux agents les mieux appropriés. Ces agents sont appelés des contractants ("contractors"). Enfin, gestionnaires et contractants échangent les informations nécessaires durant l'accomplissement des tâches. Dans des cas exceptionnels, un gestionnaire peut annuler le contrat: annoncer au contractant qu'il faut abandonner l'exécution de la tâche.

Dans [52], les auteurs proposent un schéma où des agents sont déployés dans chaque PU et SU. Pour la coopération, les auteurs utilisent le protocole contract net pour permettre une allocation dynamique du spectre et échanger les messages entre les utilisateurs.

Un problème qui peut survenir avec le réseau contractuel est qu'une tâche puisse être attribuée à un contractant moins qualifié pour la résoudre si un contractant plus qualifié est occupé au moment de l'annonce des tâches.

### II.7.2 Négociation heuristique

Si les agents peuvent uniquement accepter ou rejeter les propositions d'autres agents, alors la négociation peut être très longue et inefficace puisque l'auteur d'une proposition n'a pas le moyen de vérifier pourquoi la proposition est inacceptable, ni si les agents sont proches d'un accord, ni dans quelle direction une proposition peut être changée pour convenir à l'autre agent.

Pour améliorer l'efficacité de la négociation, les agents doivent fournir des réactions plus utiles aux propositions qu'ils reçoivent. Ces réactions peuvent prendre la forme d'une **critique** ou d'une **contre-proposition** (proposition refusée ou modifiée). Une critique est un commentaire sur la partie de la proposition que l'agent accepte ou refuse. Une contre-proposition est une proposition alternative engendrée en réponse à une proposition. À partir de telles réactions, l'auteur doit être capable d'engendrer une proposition qui est probablement plus apte à mener à un accord [53].

### II.7.3 Négociation par argumentation

Pendant la négociation heuristique, les agents peuvent essayer de changer le rejet ou la modification d'une proposition faite par un autre agent en utilisant des **arguments**. Ainsi, un agent peut essayer de persuader un autre agent de répondre favorablement à sa proposition en cherchant des arguments qui identifient de nouvelles occasions, créent de nouvelles occasions ou modifient les critères d'évaluation. En plus d'engendrer propositions, contre-propositions et critiques, un agent cherche à faire la proposition la plus attirante en fournissant une information supplémentaire sous forme d'arguments pour sa proposition.

### II.7.4 Théorie des jeux

La théorie des jeux a connu un essor considérable dans les recherches scientifiques dans la dernière décennie, 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. Les jeux peuvent être classés selon le comportement et les informations des joueurs, le premier typage est selon la coopération ou la non-coopération des joueurs.

Les auteurs de [54] ont utilisé un jeu en forme normale en répondant aux cinq questions posées ou chaque application de théorie des jeux dans la radio cognitive doit répondre, les questions sont : l'existence d'un état stable, identification de cet état stable, optimisation de l'état stable, la convergence et la stabilité, pour répondre aux questions les auteurs ont adopté une approche de base pour analyser plusieurs algorithmes de couche physique dans la radio cognitive. En utilisant le modèle de jeu, les auteurs ont réussi facilement à identifier quand est ce qu'un algorithme de radio cognitive arrivera à un état stable, déterminer les types d'adaptation qui assurent la convergence et établir les régions de stabilité.

La Théorie des jeux peut être définie comme un cadre mathématique qui se compose de modèles et de techniques utilisés pour analyser le comportement itératif des

individus préoccupés par leur propre bénéfice. Ces jeux sont généralement divisés en deux types [55] : jeux coopératifs et jeux compétitifs.

**Jeux coopératifs:** tous les joueurs sont préoccupés par tous les gains globaux et ils ne sont pas très inquiets de leur gain personnel. Certains travaux récents [56][57] utilisent la théorie des jeux coopératifs pour réduire la puissance de transmission des utilisateurs secondaires afin d'éviter de générer des interférences avec les transmissions des utilisateurs primaires.

**Jeux compétitifs:** chaque utilisateur est principalement préoccupé par son gain personnel et donc toutes ses décisions sont prises de manière compétitive et égoïste. Dans la littérature existante, nous avons constaté que les concepts théoriques du jeu ont été largement utilisés pour des attributions de fréquences dans les réseaux RC [58][59][60], où lorsque les utilisateurs primaires et secondaires participent à un jeu, ils ont un comportement rationnel pour choisir les stratégies qui maximisent leurs propres gains.

La propriété la plus connue des approches de la théorie des jeux est appelée « Equilibre de Nash (EN) ». Dans l'EN, chaque joueur est supposé connaître les stratégies d'équilibre des autres joueurs, et aucun joueur n'a rien à gagner en changeant sa propre stratégie.

Dans les jeux de négociation, les joueurs individuels ont la possibilité de coopérer afin de parvenir à un accord mutuel. En même temps, ces joueurs peuvent avoir des conflits d'intérêt et aucun accord ne peut être fait avec n'importe quel joueur individuel sans son approbation. Pour les réseaux RC, les jeux de négociation sont appliqués pour allouer des bandes de fréquences dans les réseaux centralisés et décentralisés ; les auteurs de [61] proposent de concevoir des réseaux autonomes sécurisés où les terminaux et les stations de base interagissent et s'auto-adaptent d'une manière intelligente sans avoir besoin d'un contrôleur central ou d'un régulateur. Sachant que la conception du réseau se fait à l'état d'équilibre.

Il faut mentionner que même si les jeux coopératifs et compétitifs ne s'intéressent qu'à la résolution de l'EN et l'analyse de ses propriétés, ils ne fournissent pas de détails sur l'interaction des joueurs pour atteindre cet équilibre [59].

L'efficacité de Pareto est un autre concept important de la théorie des jeux. Ce terme est nommé d'après Vilfredo Pareto, un économiste italien, qui a utilisé ce concept dans ses études et l'a défini comme [62]:

"A situation is said to be Pareto efficient if there is no way to rearrange things to make at least one person better off without making anyone worse off ".

Dans n'importe quel jeu, quelqu'un va trouver des stratégies pures et mixtes. Une stratégie pure a une probabilité d'un seul, et sera toujours jouée. D'autre part, une stratégie mixte a de multiples stratégies coulissantes avec des probabilités qui leur sont connectées [63]. La stratégie pure sélectionne une action unique et la joue. Chaque ligne ou colonne d'une matrice de gain représente à la fois une action et une stratégie pure. La stratégie mixte choisit au hasard une action sur l'ensemble des actions disponibles selon une distribution de probabilité.

### *a Théorie des jeux dans la RC*

Dans [12], les auteurs supposent que les PU sont conscients de leur environnement et de l'existence des SU. Les PU peuvent adopter les rôles de leaders en sélectionnant un sous-ensemble de SU. Alors que dans [27], les PU n'ont pas connaissance de leur environnement, de sorte qu'ils ne sont pas conscients de la présence des SU, et les SU ne sont pas autorisés à accéder au spectre opportuniste.

Un jeu intéressant est proposé dans [64] où le PU détermine d'abord le prix du spectre fondé sur la qualité du spectre, puis, le SU décide la quantité de spectre à acheter en observant le prix.

Les auteurs de [65] formulent le problème de partage du spectre entre les PU et SU comme une concurrence sur le marché d'oligopole et utilisent un jeu non-coopératif pour obtenir l'attribution du spectre pour les utilisateurs secondaires. L'équilibre de Nash est considéré comme la solution de ce jeu.

Les auteurs de [66] ont étudié l'impact de la négociation entre la détection du spectre et l'accès au spectre sur les stratégies de coopération d'un réseau de SU qui cherchent à coopérer afin d'améliorer leur vision du spectre, réduire la possibilité d'interférences entre chaque SU et améliorer leur capacité de transmission. Les auteurs ont modélisé le problème comme un jeu de coalition sous forme de partition et un algorithme pour la formation de la coalition est proposé. En utilisant cet algorithme, le SU peut prendre des décisions individuelles distribuées pour rejoindre ou quitter une coalition tout en maximisant leurs utilités.

La théorie des jeux permet de comprendre plusieurs aspects moins connus, qui se posent dans les situations de conflits d'intérêts. Il développe un cadre pour analyser la prise de décision dans de telles situations où l'interdépendance des agents est considérée comme le problème de l'accès au spectre entre SU dans les réseaux de radio cognitive. Mais, tous les problèmes de concurrence ne peuvent être analysés à l'aide de la théorie des jeux.

### **II.7.5 Théorie des enchères**

Une enchère désigne généralement la mise en vente d'un produit, d'un service ou d'un bien généralement rare qui sera cédé au plus offrant. Le terme « enchère » désigne toute technique de vente établissant une concurrence, qui a pour objectif de déterminer le futur possesseur de l'article en jeu, par des offres successives.

La théorie de ventes aux enchères présente des protocoles utilisés dans des SMA pour définir des moyens de négociation entre ces agents.

Une session d'enchères consiste en un vendeur, plusieurs acheteurs potentiels et un protocole d'enchères. En général le but du vendeur est d'obtenir le plus haut prix pour son produit, et celui des acheteurs est d'obtenir ce produit au plus bas prix.

Actuellement, il existe plusieurs protocoles d'enchère, seulement les plus fréquemment utilisés sont cités dans ce qui suit:

**Enchère ascendante (anglaise)**

Elle est certainement la plus populaire et la plus commune à tous. L'initiateur commence l'enchère, d'habitude par l'annonce d'un prix de réservation (le prix minimal pour lequel il est d'accord pour vendre l'objet). Chaque participant annonce publiquement son offre, en plusieurs tours successifs. Quand aucun participant ne veut plus augmenter son offre, l'enchère s'arrête et le participant ayant fait la plus grande offre gagne l'objet au prix de son offre.

La stratégie dominante de l'agent acheteur est donc de proposer une somme la plus petite possible qui soit supérieur à celle enregistrée jusqu'à ce que la surenchère atteigne la valeur maximale qu'il peut offrir.

**Enchère descendante (hollandaise)**

L'initiateur commence par proposer un prix et, par des tours successifs, diminue ce prix jusqu'au moment où un des participants achète l'objet au prix proposé.

**Enchère à enveloppe scellée (au premier prix)**

L'initiateur commence l'enchère et chaque participant soumet une offre sous enveloppe ou électroniquement, dans un tour unique, sans savoir les offres des autres. Le participant qui a fait la plus grande offre gagne l'objet et paye le montant de son offre.

C'est un processus « statique » puisqu'il ne comporte qu'un tour. De plus, une des caractéristiques de ce type d'enchère est que l'enchérisseur ne reçoit aucun signal (offre) de la part des autres enchérisseurs.

Ici on ne peut donc parler de stratégie dominante, puisque l'acheteur n'a pas de vision des mises des autres agents.

**Enchère de Vickery (enveloppe scellée au second prix)**

Ici, aucun agent n'a connaissance de la mise des autres agents. Lorsque l'agent remporte l'enchère (en ayant proposé la somme la plus élevée), il remporte le produit mais au prix de la seconde mise, c'est à dire celle se trouvant juste au-dessous de la mise gagnante.

La stratégie dominante d'un participant dans ce cas est de soumettre une offre avec sa valeur privée de l'objet. À cause de cette stratégie, l'enchère Vickery est un protocole préféré pour les agents logiciels. Pourtant, elle est moins répandue dans les enchères entre humains à cause du fait que l'initiateur peut mentir sur le deuxième prix le plus élevé et faire payer le gagnant plus que ce prix.

***a Utilisation des enchères dans la RC***

En général, une vente aux enchères est constituée de plusieurs intervenants, la table suivante décrit la différence entre des enchères classiques et ce qui correspond à chaque intervenant lorsqu'on applique cette méthode pour la négociation dans les réseaux RC.

Enchères classiques	Enchères dans les réseaux RC
Objets à vendre	Canaux libres
Enchérisseurs	Utilisateurs secondaires (SU)
Vendeurs	Utilisateurs primaires (PU)
Commissaire-priseur	Régulateur

Tableau 4: Différence entre des enchères classique et dans les réseaux RC

Les enchères sont basées sur le concept de vente et d'achat de biens ou de services. Le but principal de l'utilisation des enchères dans les réseaux RC est de fournir une motivation aux SU pour maximiser leur utilisation du spectre. Afin d'utiliser pleinement le spectre, l'allocation dynamique du spectre utilisant les enchères est devenue une approche prometteuse qui permet aux SU de louer des canaux inutilisés par les PU.

En général, les solutions proposées par les différents auteurs qui travaillent sur la théorie des enchères pour l'accès dynamique au spectre se basent sur une architecture avec infrastructure [67].

Dans [68], les auteurs proposent un mécanisme pour un partage efficace et équitable des ressources spectrales où il faut un coordinateur pour gérer le bon fonctionnement. Ils modélisent l'accès au spectre dans les réseaux RC tels des enchères répétées.

Dans les solutions basées sur les enchères, chaque canal est assigné à un seul réseau, c'est à dire qu'il n'y a pas la notion de SU et de PU dans le même canal. Dans la littérature, deux possibilités s'offrent:

Soit le régulateur alloue les canaux aux utilisateurs primaires, ces derniers allouent indépendamment les portions inutilisées de leur canal aux SU [69].

Soit le régulateur alloue le droit d'être SU ou PU dans le canal [29].

La méthode de paiement est souvent un problème majeur lorsqu'on veut appliquer les enchères dans les réseaux de télécommunication, c'est pour cela que certains chercheurs essaient de trouver des solutions adéquates. Par exemple les auteurs de [70] utilisent les enchères à second prix pour résoudre le problème d'allocation du spectre et développent une approche qui introduit la notion d'argent fictif pour le paiement en temps réel. Une autre approche intéressante aussi est proposée dans [71] où les auteurs pensent qu'il n'y a pas de notion d'argent pour réaliser les enchères mais le prix à payer n'est rien d'autre que le temps d'attente.

Cependant, quelques recherches ont été faites par [72] et proposent une approche classique basée sur les enchères, ensuite les auteurs font une extension de leur approche à un scénario qui suppose qu'il y a des bandes libres gratuites. C'est-à-dire que le SU aura le choix entre payer et avoir une bonne QoS ou bien accéder aux canaux gratuitement et risquer de rencontrer des interférences avec les utilisateurs (si plusieurs SU opèrent en même temps sur ses canaux).

Les auteurs de [67] construisent un réseau de RC et proposent une approche de gestion de spectre basée sur les enchères de Vickrey.

Dans [73], les auteurs examinent comment utiliser les mécanismes d'enchères et allouer des prix aux ressources du spectre de sorte que le chiffre d'affaires du PU soit maximisé. Les auteurs commencent par classer un certain nombre de formats d'enchères alternatives en termes de demande de spectre puis étudier une enchère spécifique où les fournisseurs de services sans fil secondaires ont des exigences pour les emplacements fixes (cellules). Ils proposent une vente aux enchères optimale basée sur le concept de l'évaluation virtuelle. En supposant que la connaissance des distributions d'évaluation, la vente aux enchères optimale utilise le mécanisme Vickrey-Clarke-Groves (VCG) (généralisation d'une vente aux enchères Vickrey pour plusieurs articles) afin de maximiser les recettes attendues tout en appliquant la véracité. Afin de réduire la complexité de calcul, ils conçoivent en outre un sous-optimale aux enchères honnête avec la complexité polynomiale. Il utilise une allocation monotone et le paiement de valeur critique pour faire respecter la véracité. Les résultats de simulation montrent que cette vente aux enchères sous-optimale peut générer des revenus attendus stables.

Les auteurs de [74] considèrent un réseau de radio cognitive qui contient un seul PU et de nombreux SU. Ils utilisent une technique basée sur les ventes aux enchères pour l'accès dynamique au spectre. Les auteurs ont suggéré d'utiliser des enchères à un seul tour surtout si on cherche à satisfaire les applications qui nécessitent une réponse immédiate, car l'utilisation des enchères à plusieurs tours peut nous faire perdre quelques secondes car la procédure est légèrement plus longue et plus lente. Afin de maximiser les gains du PU, l'utilisation des enchères à plusieurs tours est mieux. Mais, si on est intéressés par le nombre de SU satisfaits, il est préférable d'utiliser des enchères à un seul tour car la procédure est plus rapide. La méthode proposée par les auteurs a également prouvé que pour résoudre le problème de la congestion du spectre, nous devrions utiliser l'une des techniques d'accès au spectre plutôt que de ne rien utiliser et satisfaire la première demande reçue.

Les enchères sont souvent modélisées comme un mode concurrentiel; dans ce cas, la radio cognitive ne peut fonctionner que dans une façon non-coopérative. Contrairement à ça, la théorie des jeux et les SMA semblent être un moyen de surmonter cette limite de façon coopérative. Ainsi, la radio cognitive peut fonctionner en deux modes coopératifs et compétitifs.

Une autre façon d'utiliser les ventes aux enchères est proposée dans [75], où les auteurs ont prouvé que dans certains scénarios le spectre est utilisé efficacement lorsque plusieurs SU gagnent l'accès à un seul canal, c'est ce qui distingue leur méthode des enchères traditionnelles où un seul utilisateur peut gagner.

Dans ces solutions, les comportements des utilisateurs sont mensongers, de sorte que le gestionnaire centralisé ne peut pas optimiser la fonction d'utilité globale du réseau [58].

### II.7.6 Décision multicritère

L'aide à la décision est un processus qui utilise un ensemble d'informations disponibles à un instant donné, afin de formuler un problème et aboutir à une décision sur un objet précis. Dans le cadre de la décision multicritères, l'objet de la décision est formé par un ensemble d'actions ou alternatives.

Prendre une décision, c'est trancher entre plusieurs possibilités et choisir celle qui sera effectivement mise en œuvre. En aide à la décision multicritère, on suppose que les différentes alternatives se présentant au décideur peuvent être décrites sur un certain nombre de propriétés ou attributs. Si l'on est capable d'établir une échelle de préférence sur un attribut, on parle alors de critère.

Les méthodes multicritères diffèrent selon la façon de réaliser la dernière étape, c.à.d. dans la façon d'évaluer les solutions en fonction des critères retenus. Dans la plupart des méthodes multicritères, l'importance relative des critères accordée par les décideurs est représentée par des poids.

Parmi les méthodes multicritères les plus connus, nous avons TOPSIS (Technic for Order Performance by Similarity to Ideal Solution), ELECTRE (Outranking Method), AHP (Analytic Hierarchie Process) ainsi que PROMETHEE (Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment), etc.

#### ***TOPSIS***

La méthode « TOPSIS » a été développée à l'origine par Hwang et Yoon en 1981 [76] avec, notamment, d'autres développements de Yoon en 1987, et Hwang, Lai et Liu en 1993 [77].

TOPSIS est une méthode d'analyse multicritères pour l'aide à la prise de décision. L'idée principale de cette méthode est de choisir l'action ayant :

La plus petite distance à l'action dite « idéale » (positive-ideal solution).

La plus grande distance à l'action dite « anti-idéale » (negative-ideal solution).

La figure 14 décrit les différentes étapes de l'algorithme TOPSIS:

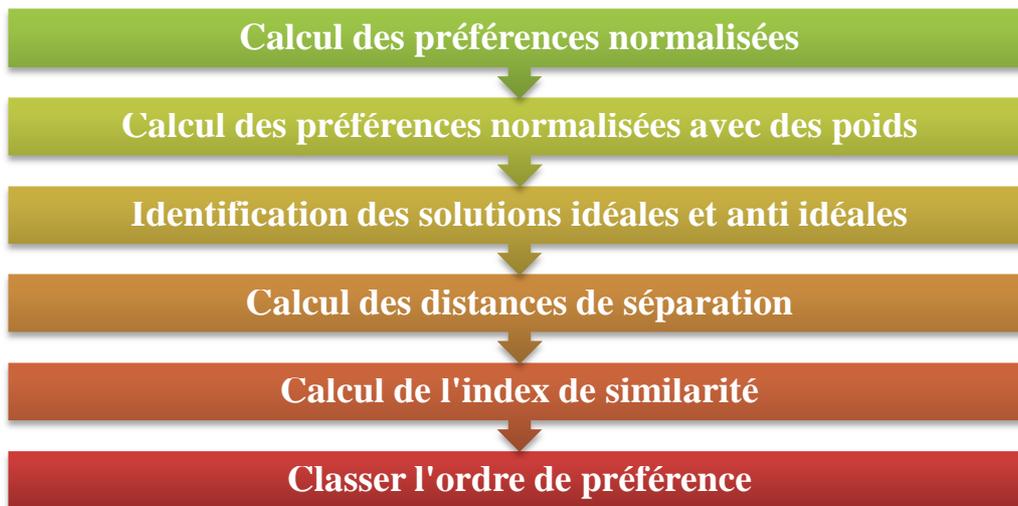


Figure 14: Différentes étapes de l'algorithme TOPSIS

Dans ce qui suit, nous allons détailler les différentes étapes de l'algorithme TOPSIS, un exemple applicatif est donné en annexe.

### Étape 1 : Calcul des préférences normalisées

La construction d'une matrice normalisée pour transformer l'attribut à divers dimensions en attributs adimensionnels, ce qui permet une comparaison entre les attributs.

$$r_j(x_i) = \frac{g_j(x_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (g_j(x_i))^2}} \quad i=1..m, j=1..n$$

### Étape 2 : Calcul des préférences normalisées avec des poids associés aux critères

La construction d'une matrice normalisée et pondérée.

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \cdot r_{11} & \cdots & W_n \cdot r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_1 \cdot r_{m1} & \cdots & W_n \cdot r_{mn} \end{bmatrix}$$

$$V_j(x_i) = w_j r_j(x_i) \quad i = 1, \dots, m. j = 1, \dots, n$$

$w_j = \{ w_1, w_2, \dots, w_n \}$  : L'ensemble des poids associés aux critères.

### Étape 3 : Identification des solutions idéales et anti-idéales

$$A^* = \{v_1^*, \dots, v_j^*, \dots, v_n^*\} = \{(\max_i v_j(x_i)/ j \in J_1), (\min_i v_j(x_i)/ j \in J_2)\}$$

$$A' = \{v_1', \dots, v_j', \dots, v_n'\} = \{(\min_i v_j(x_i)/ j \in J_1), (\max_i v_j(x_i)/ j \in J_2)\}$$

$J_1$  : ensemble des critères de bénéfice.

$J_2$  : ensemble des critères de coût.

**Étape 4 : Calcul des distances de séparation**

- Distance idéale

$$d^*(x_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_j^* - v_{ij})^2}$$

- Distance anti-idéale

$$d'(x_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_j' - v_{ij})^2}$$

**Étape 5 : Calcul de l'indice de similarité à la solution idéale**

$$c(x_i) = \frac{d'(x_i)}{(d^*(x_i) + d'(x_i))} \quad 0 < c(x_i) < 1 \quad i = 1..m$$

$C(x_i) = 1$  Si  $A(x_i) = A^*$  (solution idéale).

$C(x_i) = 0$  Si  $A(x_i) = A'$  (solution anti-idéale).

**Étape 6 : Classer l'ordre de préférence**

- Choisir l'action ayant le plus grand index de similarité.

- Ranger les actions par ordre décroissant des index de similarité.

***ELECTRE***

**ELECTRE** est une famille de méthodes d'analyse multicritères développée en Europe. L'acronyme ELECTRE signifie **E**limination **E**t **C**hoix **T**raduisant la **R**Ealité.

- **Electre I :**

Cette méthode permet de résoudre les problèmes multicritère de *choix*. Cette méthode permet d'identifier le sous-ensemble d'actions offrant le meilleur compromis possible. Souvent utilisée dans le choix de projets concurrents, afin d'identifier le sous-ensemble de projets le plus performant sur la base des critères considérés. Dans le cas de la méthode Electre I, on définit de vrai-critères, on retrouve également une notion de concours dans cette méthode; retenir les meilleurs [78].

- **Electre II :**

Cette méthode classe les actions potentielles de la "meilleure" à la "moins bonne", en tolérant les ex aequo [78].

Il est important de noter que ce rangement se base sur la valeur relative de chaque action par rapport aux autres actions. La meilleure action du classement ne veut pas forcément dire que c'est une bonne action.

- **Electre-III :**

La méthode multicritère Electre III permet d'établir un classement parmi des actions susceptibles d'apporter une solution à un problème de décision et ce, en se basant sur plusieurs critères. La complexité de cette méthode rend fastidieuse l'éventuelle analyse de sensibilité qu'on voudrait en faire.

Electre III est une technique qui permet, en se basant sur plusieurs critères, d'effectuer un classement au sein d'un ensemble d'actions potentielles constituant un éventail de solutions possibles à un problème de décision [78].

- **Electre IV :**

Cette méthode s'applique aux problèmes dans lesquels il n'est pas possible d'attribuer des poids aux critères. Néanmoins, ceux-ci doivent respecter ce qu'on appelle l'hypothèse suivante:

« Aucun critère n'a, à lui seul, une importance supérieure ou égale à celle d'une coalition rassemblant au moins la moitié des critères »

- **Electre-Tri :**

Electre-tri est une méthode qui permet de résoudre des problèmes d'affectation, le principe de la méthode est d'assigner un ensemble de  $m$  d'alternatives ou d'actions noté

$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_m\}$  sur lesquelles se base la décision à des catégories ou classes bien définies.

On note l'ensemble  $F = \{1, 2, \dots, n\}$  l'ensemble des indices des critères. Chaque action de l'ensemble  $A$  sera évaluée par une fonction réelle, exprimant l'évaluation de l'action pour un

critère donné, on note  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$  l'évaluation de l'action pour les critères considérés.

L'importance des critères dans la prise de décision est évaluée par un ensemble de poids

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ .

### **PROMETHEE**

Les méthodes Prométhée, développées par Brans et al (1986) sont des méthodes d'analyse multicritères de sur-classement. Elles permettent de définir des relations de sur-classement, d'indifférence et d'incomparabilité entre deux scénarii. Le but est de ranger les scénarii du meilleur au moins bons. Pour chaque scénario, une note et un poids sont attribués à chaque critère, afin d'évaluer l'indice de préférence d'un scénario sur l'autre. Cet indice est ensuite utilisé pour calculer l'attractivité d'un scénario sur l'autre, définie comme différence entre la dominance d'un scénario par rapport à tous les autres et la soumission de ce scénario par rapport à tous les autres.

Les méthodes Prométhée sont utilisées dans de nombreux cas de recherches opérationnelles, et plus récemment dans la prise de décision en matière environnementale.

L'objectif des méthodes d'analyse multicritère PROMETHEE est de construire via un système de préférences floues, un classement des alternatives des meilleures aux moins bonnes ; ce classement étant un pré-ordre partiel (préférence stricte, indifférence et incomparabilité) pour PROMETHEE I, et un préordre complet (indifférence et préférence stricte) pour PROMETHEE II.

### ***Méthode AHP (Analytic Hierarchy Process)***

AHP, en français processus d'analyse hiérarchique permet de résoudre des problèmes plus complexes. C'est une méthode à la fois puissante et souple. Elle a été développée par Thomas Saaty en 1970 et permet de décomposer un problème complexe en un système hiérarchique, dans lequel sont établies des combinaisons binaires à chacun des niveaux de la hiérarchie. Classant hiérarchiquement les situations que rencontre l'entreprise, le décideur peut en déduire des priorités relatives, en faire une synthèse plus facile à appréhender et s'en servir pour allouer efficacement ses ressources et/ou définir les objectifs prioritaires dans une meilleure cohérence.

#### ***b Décision multicritères et RC***

Dans [79] [80], les auteurs proposent une technique de décision pour le handover vertical basée sur l'algorithme TOPSIS. Dans [79], ils combinent les méthodes de la décision multicritères, les processus de réseaux analytiques et l'algorithme TOPSIS amélioré. Les résultats de la simulation montrent que la technique proposée peut effectivement réduire le phénomène d'inversion et le nombre de sauts.

Dans [80], ils combinent SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) et AHP (Analytic Hierarchy Process) . Cette approche s'avère être un outil mathématique efficace pour les problèmes qui ont besoin de prendre des décisions. Elle permet de sélectionner la solution optimale parmi les réseaux disponibles.

Dans [81], les auteurs précisent que l'utilisateur a besoin d'être toujours bien connecté (Always Best Connected: ABC). Pour cela, il existe plusieurs critères relatifs à l'accès aux réseaux sans fils et mobiles. Les auteurs divisent les critères en 3 groupes: performance, prix et accessibilité. Ils utilisent ensuite un algorithme de décision multicritère (AHP) pour classer les critères afin que l'utilisateur soit ABC.

## **II.8 Etat de l'art sur l'utilisation des SMA dans la RC**

L'association des SMA avec la RC assure un futur remarquable pour la gestion optimale des fréquences (en comparaison avec les techniques de contrôle rigides proposées par les opérateurs de télécommunications). Dans le cas de l'utilisation des bandes sans licence, le terminal RC doit coordonner et coopérer pour un usage meilleur du spectre sans causer d'interférences.

Dans [82], l'auteur propose une architecture basée sur les agents où chaque terminal RC est équipé d'un agent intelligent, il y a des modules pour collecter les informations à propos de l'environnement radio et bien sur les informations collectées seront stockées dans une base de connaissance partagée qui sera consultée par tous les agents. L'approche proposée est basée sur les SMA coopératifs (les agents ont des intérêts en commun). Ils collaborent en partageant leurs connaissances pour augmenter leur gain individuel ainsi que collectif.

Des agents sont déployés sur les terminaux RC des utilisateurs primaires PU et des utilisateurs secondaires SU et coopèrent entre eux dans les travaux proposés par [52][83][12]. Par SMA coopératif, on veut dire que les agents PU échangent des t-uples de messages dans le but de s'améliorer eux mêmes ainsi que le voisinage des agents SU. Ils proposent que les SU doivent prendre leur décision en se basant sur la quantité du spectre disponible, le temps et le prix proposé par les agents PU. Et ils doivent commencer le partage du spectre dès qu'ils trouvent une offre appropriée (Sans attendre la réponse de tous les PU). En d'autres termes, l'agent SU doit envoyer des messages à l'agent PU voisin approprié, et bien sur le PU concerné doit répondre à ces agents pour faire un accord sur le partage du spectre. Et bien sur après la fin de l'utilisation du spectre, le SU doit payer le PU.

Une comparaison est faite par [83] entre un agent et une RC. Principalement, les deux sont conscients de leur environnement à travers les interactions, détection, surveillance. Ils sont autonomes, ils peuvent résoudre des tâches en se basant sur leurs propres capacités et bien sur ils peuvent coopérer avec leurs voisins en échangeant des informations.

<b>Agent</b>	<b>Radio Cognitive</b>
Conscience de l'environnement à travers les anciennes observations	Détecte les espaces blancs du spectre et les signaux des utilisateurs primaires
Agit à travers des actionneurs	Décider quelle bande/canaux va être sélectionnés
Interaction via la coopération	Interaction via le balisage
Autonomie	Autonomie
Travaillent ensemble pour atteindre des objectifs communs	Travaillent ensemble pour un partage efficace du spectre
Contient une base de connaissance avec des informations locales et sur les agents voisins	Maintient certains modèles d'utilisation du spectre des utilisateurs primaires voisins

Tableau 5: Comparaison entre un agent et une radio cognitive

Pour rendre les systèmes de RC pratiques, il faut que plusieurs réseaux RC coexistent entre eux. Cependant, ceci peut générer des interférences. Pour remédier à ce problème, les SU peuvent coopérer pour détecter le spectre aussi bien que pour le partager sans causer d'interférences pour le PU [64]. Pour cela, ils proposent des schémas pour protéger les PU des interférences en contrôlant la puissance de transmission du terminal cognitif.

L'auteur dans [58][84] propose une coopération entre les PU et les SU et entre les SU seulement. Des agents sont déployés sur les terminaux des utilisateurs pour coopérer et aboutir à des contrats régissant l'allocation du spectre. Les agents SU coexistent et coopèrent avec les agents PU dans un environnement RC Ad-hoc en utilisant des messages et des mécanismes de prise de décision. Vu que les comportements internes des agents sont

coopératifs et désintéressés, ça leur permet de maximiser la fonction d'utilité des autres agents sans ajouter de coût conséquent en termes de messages échangés.

Cependant, l'allocation des ressources est un enjeu important dans les systèmes de RC. Il peut être fait en effectuant la négociation parmi les utilisateurs secondaires [61][85]. Dans [61], les auteurs proposent un modèle basé sur les agents pour la négociation du spectre dans un réseau RC. Mais au lieu de négocier le spectre directement entre des PU et des SU, un agent courtier est inclus. Ce qui veut dire que l'équipement du PU ou du SU ne nécessite pas une grande intelligence vu qu'il n'a pas besoin d'effectuer la détection du spectre ou autre chose. L'objectif de cette négociation est de maximiser les bénéfices et les profits des agents pour satisfaire le SU. Les auteurs ont proposé deux situations, la première utilise un seul agent qui va exploiter et dominer le réseau, et dans la deuxième, il va y avoir plusieurs agents en concurrence.

Une étude a été faite par [86] sur la RC dans les réseaux WLAN et la possibilité d'introduire la technologie d'agents, en d'autres termes ils essayent de résoudre le problème de l'allocation des ressources radio en associant la gestion des ressources WLAN dans un environnement décentralisé, ceci en utilisant les SMA. Pour cela, ils proposent une approche basée sur les SMA pour le partage d'information et la distribution des décisions parmi de multiples WLAN d'une manière distribuée.

Les interférences causées par l'acquisition des canaux dans un système cellulaire au cours des Handovers peuvent être réduites selon [60] en utilisant une RC pour la gestion du Handover. En effet, la mobilité du terminal lui impose un comportement différent au moment du changement de zones. Le terminal doit assurer la continuité de service de ses applications ainsi que la gestion efficace du spectre. Les auteurs proposent une approche qui utilise la négociation, l'apprentissage, le raisonnement et la prédiction pour connaître les besoins des nouveaux services dans les réseaux sans fil modernes. Ils proposent un algorithme à exécuter par le terminal cognitif mobile lors de la phase de Handover.

Le SMA contient plusieurs agents intelligents en interaction entre eux. Chaque agent peut faire la détection et l'apprentissage. L'agent peut sélectionner les comportements basés sur l'information locale et tenter de maximiser les performances globales du système. Dans [87], l'auteur a décrit une nouvelle approche basée sur l'apprentissage par renforcement multi-agent qui est utilisée sur des réseaux RC ad-hoc avec contrôle décentralisé. En d'autres termes, ils ont mis en place plusieurs scénarios de RC et ils affectent à chaque cas une récompense ou une pénalité. Les résultats de cette approche ont montré qu'avec cette méthode, le réseau peut converger à un partage équitable du spectre et bien sur elle permet de réduire les interférences avec les utilisateurs primaires PU.

Une approche très intéressante est proposée par [88] où les auteurs ont appliqué l'apprentissage par renforcement sur des cas uni-agent SARL et multi-agents MARL pour atteindre la sensibilité et l'intelligence. Ils montrent dans leurs résultats que les SARL et les MARL réalisent une action commune qui donne un meilleur rendement à l'échelle du réseau. Ils ont fini par dire l'apprentissage par renforcement RL est un algorithme adapté pour être appliquée dans la plupart des schémas d'application.

Dans la solution proposée dans [89], un mécanisme d'apprentissage local comme le MARL est disponible pour chaque agent. L'apprentissage local fournit pour chaque agent une récompense pour qu'il puisse prendre la bonne décision et choisir la meilleure action. Ils ont modélisé chaque nœud de communication de SU comme un agent d'apprentissage car le récepteur et l'émetteur partagent une issue commune d'apprentissage ou de connaissance.

Les auteurs ont présenté le LCPP (Locally Confined Payoff Propagation) qui est une fonction importante dans l'apprentissage par renforcement dans les SMA pour atteindre l'optimalité dans la coopération entre agents dans un réseau RC distribué.

Un schéma de sélection de canal sans négociation est considéré pour le multi utilisateur et le multi-canal [85]. Afin d'éviter les collisions encourus par la non-coordination, chaque SU apprend à sélectionner les canaux en fonction de ses expériences. L'apprentissage par renforcement multi-agents est appliqué dans le cadre du Q-learning en considérant les utilisateurs secondaires comme une partie de l'environnement. Dans un tel schéma, chaque utilisateur secondaire détecte des canaux et ensuite choisit un canal de fréquence ralenti à transmettre les données, comme si aucun autre utilisateur secondaire n'existe. Si deux SU choisissent le même canal de transmission de données, ils vont entrer en collision les uns avec les autres et les paquets de données ne peuvent pas être décodés par le récepteur. Cependant, les utilisateurs secondaires peuvent essayer d'apprendre comment s'éviter les uns les autres.

Les auteurs de [90] se sont intéressés à l'utilisation de l'IEEE 802.22 et ils ont proposé un algorithme nommé "Decentralized Q-learning" basé sur la théorie de l'apprentissage multi-agent pour faire face au problème des interférences causées aux PU. Ils ont modélisé le réseau secondaire à l'aide de SMA où les différents agents sont des Stations de Base secondaires de l'IEEE 802.22 WRAN. Ils ont prouvé que le SMA proposé est capable d'apprendre automatiquement la politique optimale pour maintenir la protection pour les PU contre les interférences.

[91] et [92] ont utilisé les SMA pour concevoir un nouveau cycle de cognition avec les relations complexes d'interaction entre les différents PU, SU et les environnements sans fil coexistant et les chaînes de Markov cachées pour modéliser les interactions entre les utilisateurs et l'environnement. Les résultats de cette approche ont montré que l'algorithme peut garantir l'équité entre les utilisateurs.

Ce qui pourrait rendre l'utilisation des SMA dans la RC intéressante et plus concrète, c'est l'existence d'une plateforme de simulation pour tester les travaux proposés. C'est ce que justement proposent les auteurs de [55]. Leur plateforme permet d'étudier l'aspect émergent et comportemental des réseaux RC hétérogènes.

Les auteurs de [93][94] s'intéressent à améliorer la fiabilité du lien sans fil afin de garantir une bonne qualité de service aux terminaux RC mobiles en intégrant les systèmes multi-agents.

## II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit tous les éléments constituant un système multi-agents en partant de l'agent à l'organisation en passant par l'environnement et les interactions. Nous avons aussi décrit plusieurs techniques utilisées pour la négociation entre agents telles que la théorie des jeux, la théorie des enchères ou les méthodes de décision multicritères.

En effet, les agents sont capables d'agir, et non pas seulement de raisonner comme dans les systèmes d'IA classique. L'action, qui est un concept fondamental pour les SMA, repose sur le fait que les agents accomplissent des actions qui vont modifier l'environnement des agents et donc leurs prises de décision futures.

La RC offre une solution équilibrée au problème de l'encombrement du spectre en accordant d'abord l'usage prioritaire au propriétaire du spectre, puis en permettant à d'autres de se servir des portions inutilisées du spectre. Pour gérer intelligemment les ressources de RC, des algorithmes de négociation et de coopération issus du domaine multi-agents sont à exploiter afin d'assurer une répartition plus efficace du spectre.

Il convient de noter que la vente aux enchères est souvent modélisée comme un jeu compétitif, donc, l'hybridation de la théorie des jeux avec la vente aux enchères semble prometteuse pour l'accès au spectre, et ainsi, la RC peut fonctionner en deux modes coopératifs et compétitifs.

Au cours de notre recherche sur l'utilisation des SMA dans la RC, nous avons trouvé des auteurs qui utilisent la coopération entre PU et SU, d'autres qui proposent une coopération entre SU seulement. Quelques recherches ont été faites sur l'utilisation d'un agent courtier qui va s'occuper de la négociation entre PU et SU.

L'utilisation des SMA semble être l'approche qui convient le plus à l'accès au spectre dans les réseaux de radio cognitive, car elle garantit l'autonomie des utilisateurs et ainsi, ils peuvent gérer leur propre besoin de spectre d'une manière dynamique et décentralisée.

# **CHAPITRE III**

## **Architecture proposée et contributions**

### III. CHAPITRE III: Architecture proposée et contributions

#### III.1 Introduction

La RC offre une solution équilibrée au problème de l'encombrement du spectre en accordant d'abord l'usage prioritaire au propriétaire du spectre, puis en permettant à d'autres de se servir des portions inutilisées du spectre. Pour gérer intelligemment les ressources de RC, nous pensons que l'utilisation des SMA est une approche ingénieuse qui répond aux besoins des réseaux de radio cognitive. Pour cela, des algorithmes de négociation et de coopération issus du domaine multi-agents sont à exploiter afin d'assurer une répartition plus efficace du spectre.

Avant d'appliquer les systèmes multi-agents dans un réseau de radio cognitive, il faut voir les points en commun entre ces deux technologies utilisant toutes les deux des méthodes intelligentes. En effet, il existe peu de compromis sur ce point dans la littérature; en général les chercheurs appliquent directement les SMA sans se soucier des détails.

Dans cette partie du chapitre, nous allons étudier les différentes propriétés qu'un SMA peut avoir dans un contexte radio cognitive. Ensuite, nous allons décrire l'architecture que nous proposons ainsi que les différentes approches utilisées.

#### III.2 Application des SMA dans la RC

L'approche (A, E, I, O) étudiée dans le chapitre précédent d'une manière générale nous a poussé à l'étudier sous un autre angle, cette fois-ci en l'appliquant dans un contexte radio cognitive pour avoir une vision détaillée sur les caractéristiques que peut avoir un SMA dans un réseau de RC.

##### III.2.1 Agents

Lorsqu'on parle d'agents, on parle d'autonomie, de pro-activité, de flexibilité et de communication avec les autres agents. Nous avons vu qu'il y a deux types d'agents: réactifs et cognitifs. La distinction qu'on peut faire entre cognitif et réactif tient essentiellement du processus décisionnel chez l'agent et de la représentation du monde dont il dispose.

En appliquant les SMA dans les réseaux RC, il est clair que le type d'agent utilisé est le cognitif car l'agent PU ou SU doit avoir une représentation explicite de l'environnement et des autres agents. Il faut aussi qu'il puisse tenir compte de son passé et disposer d'un but explicite ce qui est très important dans le cas d'un terminal RC. En effet, les agents RC disposent d'une base de connaissances comprenant l'ensemble des informations et des savoir-faire nécessaires à la réalisation de leur tâche et à la gestion des interactions avec les autres agents et avec leur environnement. On dit aussi que les agents sont « intentionnels », c'est-à-dire qu'ils possèdent des buts et des plans pour décider de leurs actions [98].

### III.2.2 Environnement

L'environnement est un élément important dans le processus dynamique d'un système multi-agents. Il sert à structurer les interactions avec les entités externes communes.

Dans le contexte d'un réseau radio cognitive, l'environnement est :

**Inaccessible** car les agents ne peuvent pas percevoir entièrement leur état vu que les agents sont mobiles et se déplacent tout le temps. En d'autres termes, les capteurs des agents ne leur donnent pas accès à l'état complet de l'environnement, ce qui est insuffisant pour choisir une action.

**Stochastique** car l'état suivant n'est pas déterminé de manière unique par l'état courant et l'action courante. En effet, il peut dépendre de n'importe quelle action précédente vu que l'agent RC fait un apprentissage sur les actions effectuées pour éviter toute perte de temps inutile.

**Dynamique** car son état peut changer sans l'action de l'agent dans un intervalle compris entre deux perceptions consécutives. Dans la RC, il se peut que quelques agents rejoignent ou quittent le réseau RC à tout moment ce qui veut dire que l'environnement ne reste pas statique.

**Continu** car tout passage d'un état de l'environnement à un autre nécessite une séquence infinie d'états intermédiaires. En effet, on ne sait jamais combien de messages vont échanger les PU et SU entre eux pour passer à l'état suivant.

**Séquentiel** car l'action courante nécessite l'utilisation de l'état courant et des états passés. En effet, à l'aide de l'apprentissage, le terminal RC va apprendre de ses actions précédentes et anticiper ses actions.

### III.2.3 Interactions

Une des principales propriétés de l'agent dans un SMA est celle d'interagir avec les autres agents. Ces interactions sont généralement définies comme toute forme d'action exécutée au sein du système d'agents et qui a pour effet de modifier le comportement d'un autre agent. Ferber [38] a pu faire une typologie des situations d'interactions à travers les principales composantes de l'interaction (buts, ressources, compétences). D'après [38], les buts sont incompatibles si la satisfaction de l'un entraîne l'insatisfaction de l'autre.

Dans le cas de la RC, les SU cherchent à satisfaire leur application en cherchant une bande de fréquence (BF) libre et les PU ont la possibilité de partager leur spectre aussi. Donc, on peut dire que les buts sont compatibles car il n'y a aucune contradiction entre les buts des PU et des SU.

Lorsqu'on parle de ressources, on veut dire le nombre de canaux disponibles (parties libres du spectre).



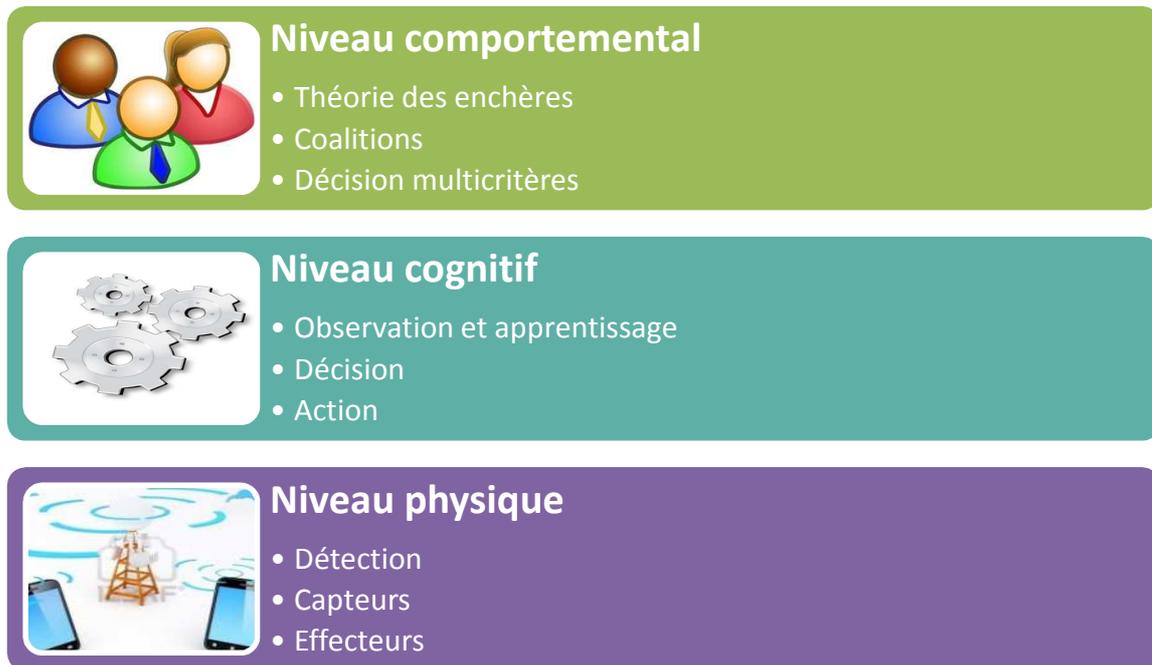


Figure 16: Architecture globale proposée

### III.3.1 Niveau physique

Le niveau physique contient l'agent physique, composé de ses capteurs et de ses effecteurs. C'est lui qui établit le contact avec l'environnement.

Nous précisons que nous ne travaillons pas sur le coté physique de l'architecture dans toutes les approches que nous avons proposé. D'ailleurs, il faut savoir que nous supposons à chaque fois que la détection du spectre a déjà été faite. C'est à dire que nous ne travaillons pas sur la partie détection de spectre mais plutôt sur la gestion du spectre.

Ceci dit, quand on parle de niveau physique, nous parlons en général d'équipements hardware. Dans les réseaux mobiles, nous parlons de terminaux mobiles. Dans le contexte de la radio cognitive, ils sont appelés CRMT (Cognitive Radio Mobile Terminal).

Nous supposons également que les CRMT utilisés sont multi mode (utilisent plusieurs technologies) et multi bande (fonctionnent sur plusieurs bandes de fréquences).

Nous pensons que le CRMT doit:

- Comporter plusieurs antennes pour faire la détection ;
- Comporter des modules frontaux pour le codage et la modulation ;
- Etre capable de changer sa fréquence d'opération ;
- Modifier les caractéristiques de transmission pour mieux utiliser le spectre.

Chaque interface radio est implémentée par des circuits intégrés conçus pour des fonctionnalités spécifiques. Le terminal utilise les fonctions de la SDR pour la reconfiguration.

La figure 17 montre un schéma qui donne une vue générale sur le terminal et comment il doit être conçu à l'intérieur pour pouvoir utiliser les fonctions de la SDR et changer de technologie et ensuite adapter et reconfigurer le CRMT selon les caractéristiques de la nouvelle technologie utilisée.

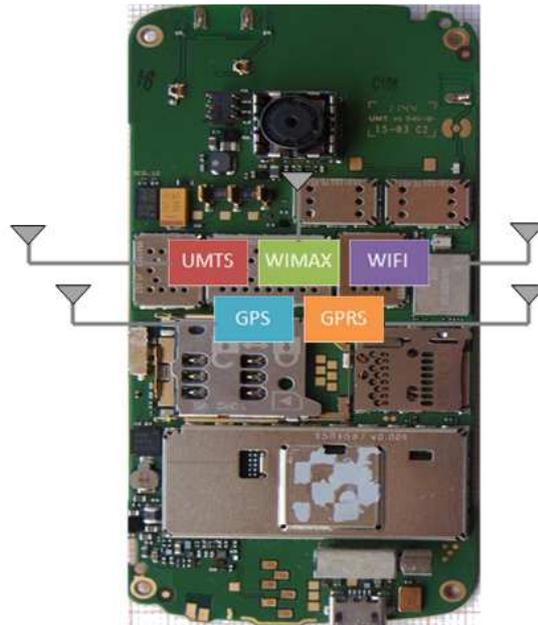


Figure 17: CRMT multi mode

### III.3.2 Niveau cognitif

Dans notre architecture, nous supposons que chaque CRMT présent dans l'environnement est doté d'un agent cognitif.

Le niveau cognitif est composé de la connaissance et des processus. Il introduit la capacité de fonctionnalisation et fait de l'agent un agent cognitif, susceptible de satisfaire les critères d'évaluation.

Lorsqu'on parle de SMA d'un point de vue Génie logiciel, il est vrai à dire qu'agent est équivalent à un thread et c'est pour cela que le cycle de vie d'un agent ressemble beaucoup à celui d'un thread. En fusionnant le cycle de vie de la radio cognitive et celui d'un agent dans une plateforme multi-agents, nous proposons le schéma suivant :

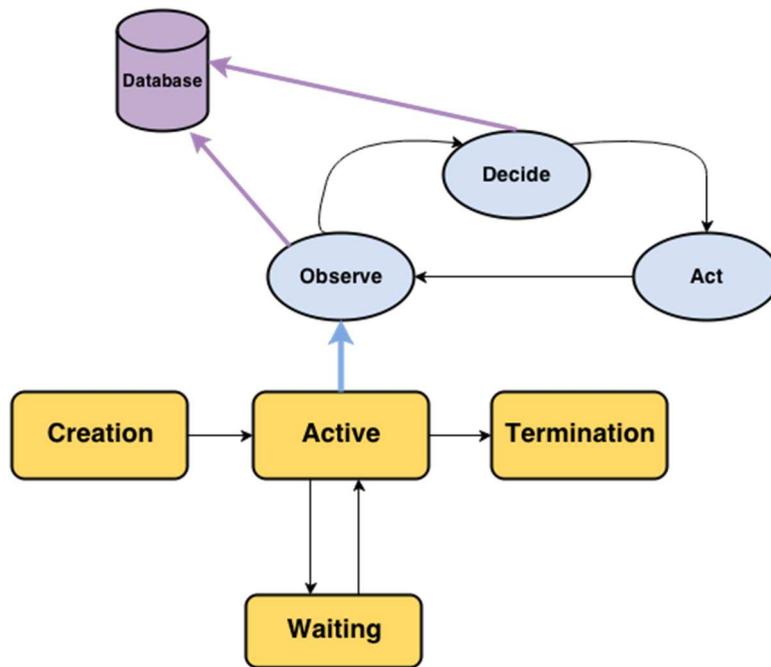


Figure 18: Cycle d'un agent radio cognitive

**Creation:** l'agent est créé ou vient d'arriver à la plate-forme. Autrement, l'agent qui dans le cas de la RC est soit PU ou SU vient d'arriver dans une certaine zone géographique où il y a plusieurs autres agents.

**Waiting :**

**Suspendu :** l'exécution de l'agent a été suspendue, soit par l'agent de gestion de système ou par l'agent lui-même. Si des messages sont adressés à un agent dans cet état, l'agent de gestion du système enverra un message d'échec à l'agent envoyant.

**En attente :** l'agent attend un certain événement par exemple des décisions.

**Termination :** L'agent est terminé lorsque l'exécution du code se termine normalement.

**Active:** l'agent démarre l'exécution de ses opérations (Observe – Decide – Act) qui sont décrites dans ce qui suit.

**Observe :** La RC observe son environnement par l'analyse du flux de stimuli entrant. Dans la phase d'observation, la RC associe l'emplacement, la température, le niveau de lumière des capteurs, et ainsi de suite pour en déduire le contexte de communication. Cette phase lie ces stimuli à des expériences antérieures pour discerner les modèles au fil du temps. La radio cognitive rassemble les expériences dans une base de données en se souvenant de tout.

La plupart des stimuli sont traités avec délibérative plutôt qu'avec réactivité. Un message entrant du réseau serait normalement traité par la génération d'un plan. Le plan devrait également inclure la phase de raisonnement dans le temps. Généralement, les réponses réactives sont préprogrammées ou apprises en étant dit, tandis que d'autres réactions de délibération sont prévues.

**Decide :** La phase de décision sélectionne un plan parmi les plans candidats. La radio peut alerter l'utilisateur d'un message entrant ou reporter l'interruption à plus tard en fonction des niveaux de QoI (Quality of Information) statués dans cette phase.

**Act :** Cette phase lance les processus sélectionnés qui utilisent les effecteurs sélectionnés qui accèdent au monde extérieur ou aux états internes de la radio cognitive. L'accès au monde extérieur consiste principalement à composer des messages qui doivent être envoyés dans l'environnement en audio ou exprimés dans différents langages appropriés.

### III.3.3 Niveau comportemental

C'est un élément essentiel de l'architecture, qui porte l'activité et la rend réactive par un traitement de nature située. Nous allons préciser et détailler la nature de tous les comportements que nous modélisons. Nous avons proposé deux types d'approches, la première est basée sur la théorie des enchères et la deuxième sur les techniques de décision multicritères.

### III.4 Comportement basé sur la théorie des enchères

Dans la figure 15, l'arbre nous montre qu'il y a deux situations que nous pouvons rencontrer: situation d'indépendance et situation de coopération.

Dans la situation d'indépendance, il n'y a aucun problème à résoudre vis-à-vis de l'interaction des agents. C'est pour cela que nous nous intéressons particulièrement à la situation de coopération. L'objectif des recherches effectuées dans le domaine de la coopération et de la négociation entre agents est l'atteinte d'un état global du SMA en favorisant la synergie des agents. Ainsi l'objectif est d'atteindre un état meilleur, d'améliorer un résultat global tout en satisfaisant au maximum l'ensemble des résultats locaux.

Lorsque les ressources utilisées par les agents sont limitées et que ces derniers sont dans une situation d'encombrement, on utilise la plupart du temps :

**La loi du plus fort** (définir un ordre de priorité en fonction de la force de l'agent), mais dans le cas de la RC, les SU ont tous le même but et veulent tous satisfaire leur besoin en spectre. Donc définir des priorités dans ce cas, revient à privilégier des types d'applications.

**Les techniques de négociation**, c'est-à-dire que des compromis vont être établis entre les agents. En effet, il est intéressant d'utiliser cette méthode car la mise en place de ces mécanismes permettrait d'aboutir à l'acceptation par un agent de coopérer avec d'autres agents. Dans le cas de la RC, il faut seulement vérifier si le PU est prêt à coopérer ou non.

Par la suite, nous allons utiliser cette méthode (la négociation) pour résoudre le problème de l'encombrement entre les SU.

Un protocole de négociation est l'ensemble de règles qui dirigent l'interaction. Pour résoudre le problème de l'encombrement causé par le manque de ressources, et bien modéliser la négociation, il faut choisir un protocole parmi ceux cités dans le chapitre précédent (Contract

Net, négociation par argumentation, négociation heuristique, théorie des jeux, théorie des enchères, méthodes d'aide à la décision).

Nous avons opté dans un premier temps pour un protocole basé sur la théorie des enchères car nous pensons que c'est une approche ingénieuse pour l'allocation de ressources à un ensemble d'agents. Il convient de savoir que l'allocation est un problème difficile dans la mesure où les ressources sont limitées par rapport au nombre de demandes.

Vu qu'une enchère restreint les variables de négociation à un nombre réduit de paramètres essentiellement le prix, ceci facilite la tâche des programmeurs.

Finalement, une enchère aboutit à une solution mutuellement acceptable à la fois pour le vendeur et les acheteurs (dans notre cas le PU et les SU), les forces du marché étant le seul arbitre du dénouement de la négociation.

L'objet des négociations dans notre scénario est le nombre de canaux disponibles chez les PU.

Actuellement, il existe plusieurs protocoles d'enchère, seuls les plus fréquemment utilisés sont cités dans la figure 19 qui suit.

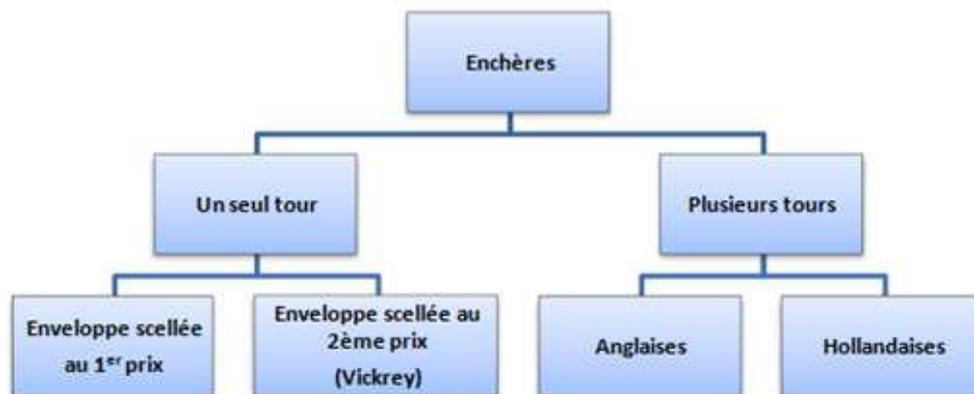


Figure 19: Organigramme représentant les types d'enchères

#### III.4.1 Topologie utilisée

Il faut savoir aussi qu'une bonne partie des chercheurs modélisent la vente aux enchères comme étant un réseau avec infrastructure, autrement dit, un régulateur est nécessaire pour diriger la vente.

Dans la littérature, la plupart des inconvénients et des problèmes liés aux enchères sont en rapport avec le régulateur (initiateur), ce dernier peut avoir un comportement mensonger, il peut aussi utiliser de faux participants pour faire augmenter l'évaluation de l'objet.

Pour éviter ce genre de problèmes, nous proposons d'utiliser dans cette approche une architecture de réseau sans infrastructure ou ce que l'on appelle généralement « un réseau ad hoc », car ce type de réseau se distingue des autres formes de réseaux par sa capacité à s'organiser de manière autonome sans infrastructure fixe. Un réseau ad hoc n'est constitué que d'un nombre variable d'entités qui communiquent entre elles de façon directe.

En d'autres termes, la communication se fera directement entre les PU et les SU. La figure 20 illustre la topologie du réseau que nous utilisons :

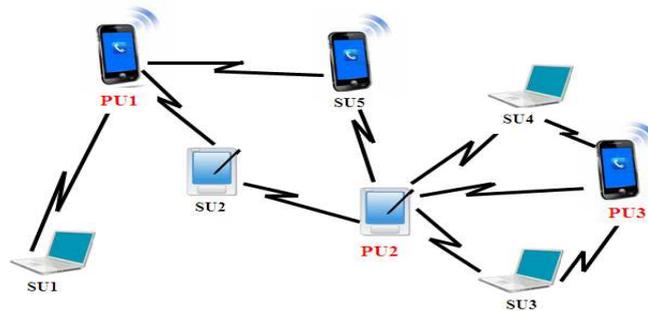


Figure 20: Topologie du réseau (mode ad hoc)

La figure 21 est un schéma général sur la négociation entre les utilisateurs primaires et secondaires en utilisant des techniques multicritères avec les agents de coalitions dans le contexte de la radio cognitive.

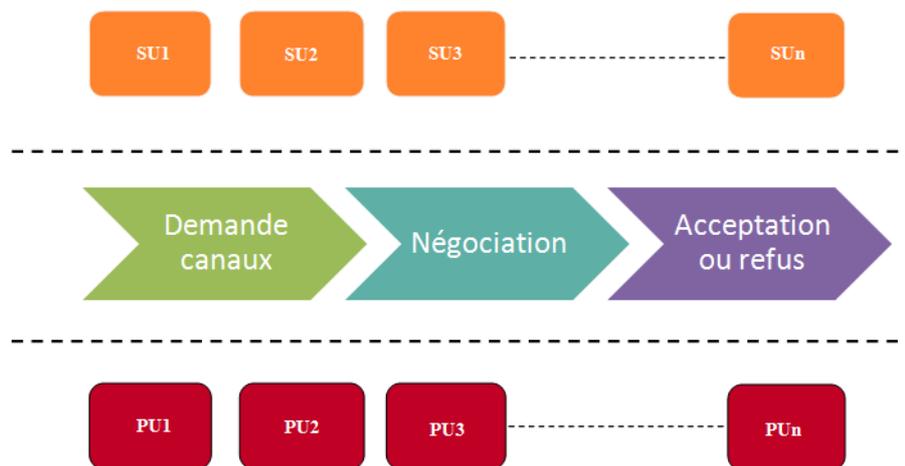


Figure 21: Architecture basée sur la théorie des enchères

Dans notre première contribution, nous proposons d'utiliser un type d'enchères à un seul tour à savoir les enchères à enveloppes scellées au premier prix et un autre type d'enchères à plusieurs tours à savoir les enchères anglaises.

### III.4.2 Enchères à enveloppes scellées au premier prix

Dans les enchères à enveloppes scellées au premier prix, chaque enchérisseur présente son offre indépendamment des autres. L'objet est attribué au plus offrant.

Dans notre scénario, l'enchérisseur correspond au SU, l'objet à vendre correspond aux canaux non utilisés par le PU.

Dans ce qui suit, nous donnons un diagramme de séquence pour les enchères à un seul tour afin de décrire comment se déroulent les actions entre les acteurs ou objets en permettant de visualiser l'enchaînement des actions dans le temps.

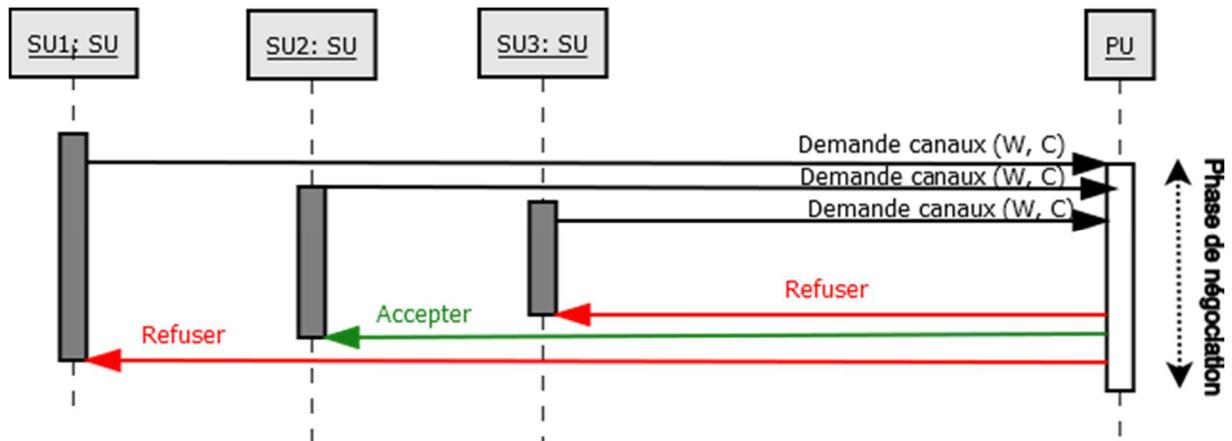


Figure 22: Diagramme de séquence "enchères à un seul tour"

Pour plus de détails, nous allons décrire le comportement des utilisateurs primaires et secondaires dans le cas des enchères à un seul tour. La figure 23 montre que le PU reçoit en premier lieu les demandes des SU, ensuite il voit s'il peut satisfaire leur demandes, si oui le PU calcule la meilleure offre et envoie un message de confirmation sinon il envoie un message de refus.

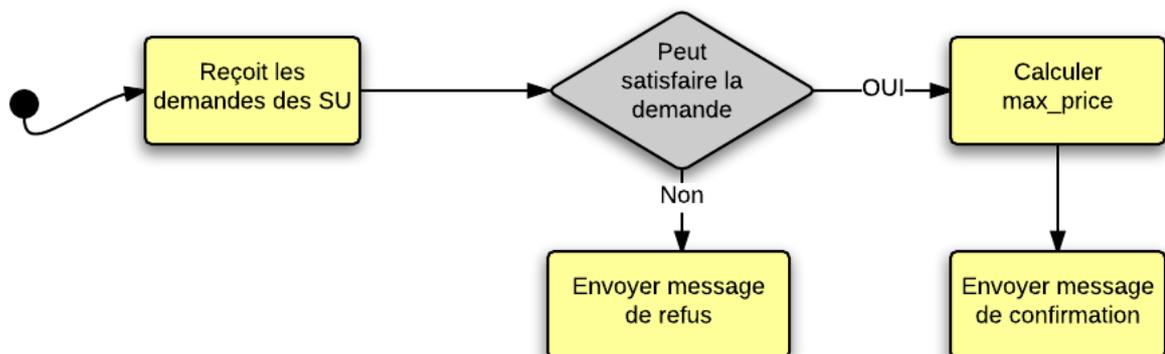


Figure 23: Comportement du PU "enchères à un seul tour"

La figure 24 montre que le SU envoie sa demande en terme de nombre de canaux et attend la réponse du PU, si la réponse est positive il peut commencer à utiliser les canaux sinon il doit refaire une autre demande.

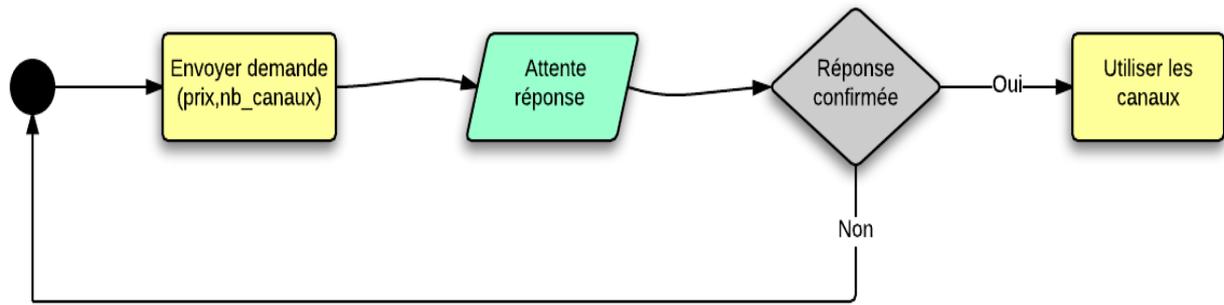


Figure 24: Comportement du SU "enchères à un seul tour"

### III.4.3 Enchères anglaises

Ce type d'enchères est le plus commun et le plus habituel. Le commissaire-priseur qui dirige les enchères annonce un prix de départ aux acheteurs potentiels, ces derniers peuvent annoncer un prix qui devra être plus élevé que le prix précédent à chaque fois ainsi de suite, jusqu'à ce que personne ne surenchérit. C'est donc celui qui annonce le dernier prix qui devient propriétaire du bien.

Dans ce qui suit, nous donnons un diagramme de séquence pour les enchères à plusieurs tours afin de décrire comment se déroulent les actions entre les acteurs ou objets en permettant de visualiser l'enchaînement des actions dans le temps.

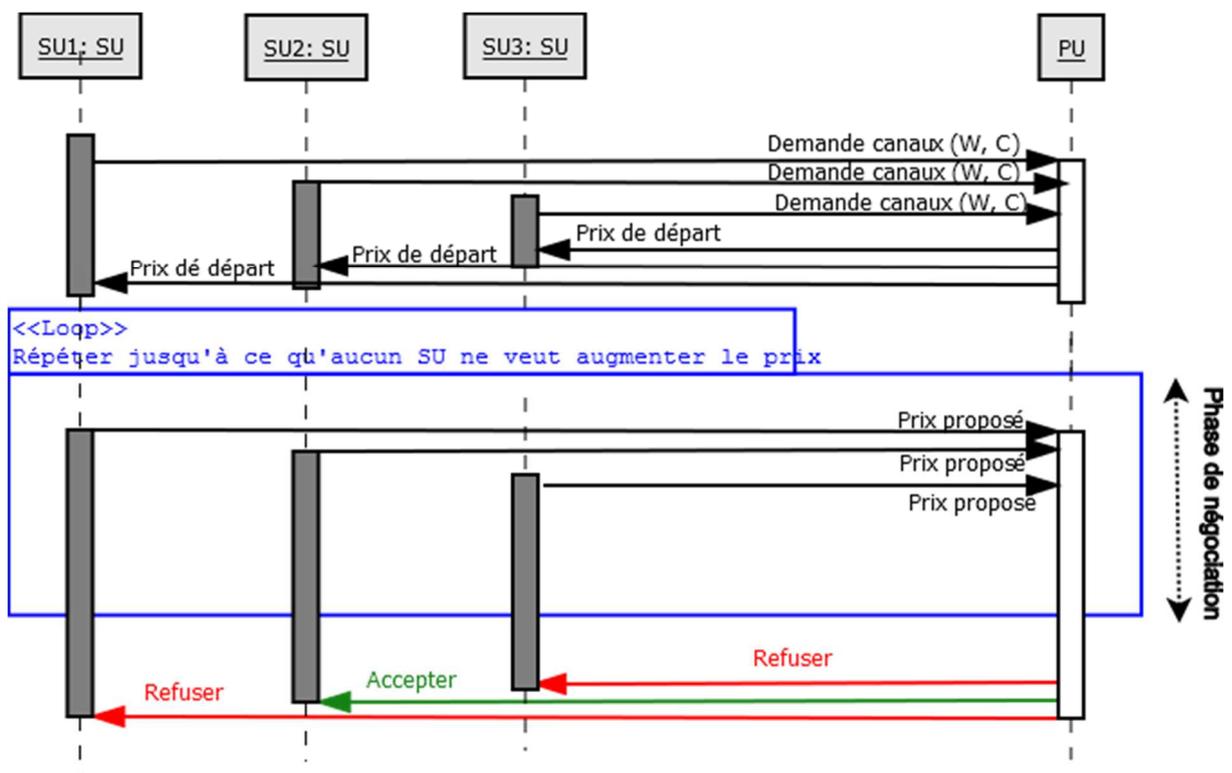


Figure 25: Diagramme de séquence "enchères à plusieurs tours"

Pour plus de détails, nous allons décrire le comportement des utilisateurs primaires et secondaires dans le cas des enchères à plusieurs tours. La figure 26 montre que dès que le PU annonce le prix de départ, il reçoit les propositions des SU et c'est à son tour de diffuser la nouvelle information aux autres utilisateurs.

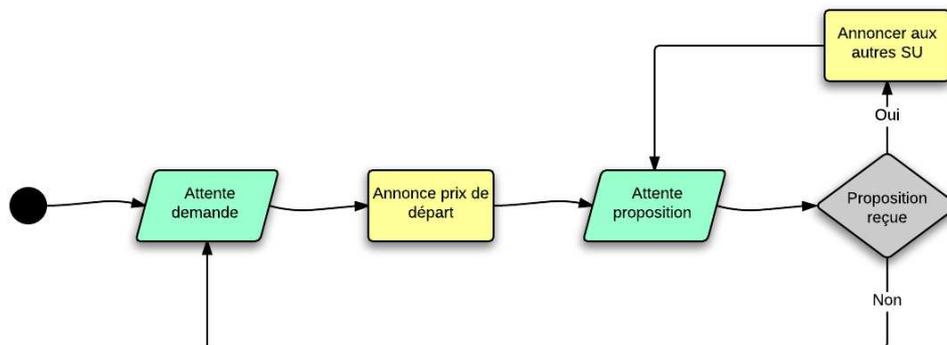


Figure 26: Comportement du PU dans les enchères à plusieurs tours

La figure 27 décrit le comportement du SU lors des enchères à plusieurs tours. On remarque qu'en premier lieu, il envoie la demande en termes de nombre de canaux, ensuite il reçoit le prix de départ envoyé par le PU, le SU propose un prix. Si le prix annoncé par le PU lui est accessible, le SU peut surenchérir jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de propositions. Et dans ce cas là, le SU aura gagné la négociation.

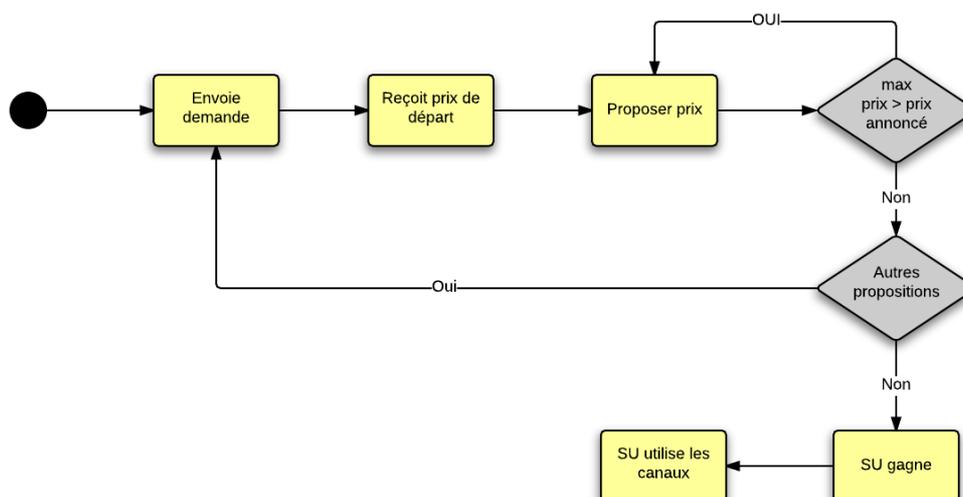


Figure 27: Comportement du SU dans les enchères à plusieurs tours

#### III.4.4 FIFO'

Nous donnons également le diagramme de séquence de la méthode FIFO' que nous avons proposé pour faire des comparaisons.

FIFO (First In First Out) est une technique employée pour la gestion des données en utilisant une file d'attente qui contient les actions à effectuer dans un ordre chronologique.

En effet, la méthode FIFO' reprend le principe de FIFO mais sans blocage. En d'autres termes, dès qu'un SU propose un prix correspondant aux attentes du PU, il peut satisfaire sa demande c'est à dire sans attendre les autres demandes des SU.

Par exemple, si le PU a 5 canaux libres et dans la même zone géographique il y a 4 SU:

Le premier "SU1" a besoin de 3 canaux, le deuxième "SU2" a besoin de 3 canaux, le 3ème "SU3" a besoin de 2 canaux et le quatrième "SU4" a besoin de 1 canal.

La figure 28 décrit un exemple de scénario de négociation entre PU et SU, nous voyons que dans le cas de la méthode FIFO (classique):

SU1 arrive, il est satisfait >> Il reste 2 canaux au PU.

SU2 arrive, le PU ne peut pas le satisfaire.

SU3 arrive, reste en attente.

SU4 arrive, reste en attente.

Alors que dans la méthode que nous proposons FIFO', lorsque le PU ne peut pas satisfaire SU2 il passe à SU3 et satisfait sa demande. Donc, avec cette méthode, nous pouvons satisfaire plus de SU qu'avec la méthode classique.

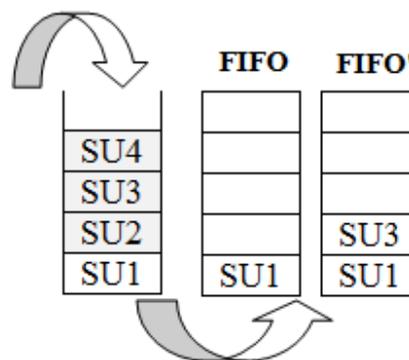


Figure 28: FIFO vs FIFO'

La figure 29 montre un diagramme de séquence qui décrit les étapes de la méthode FIFO':

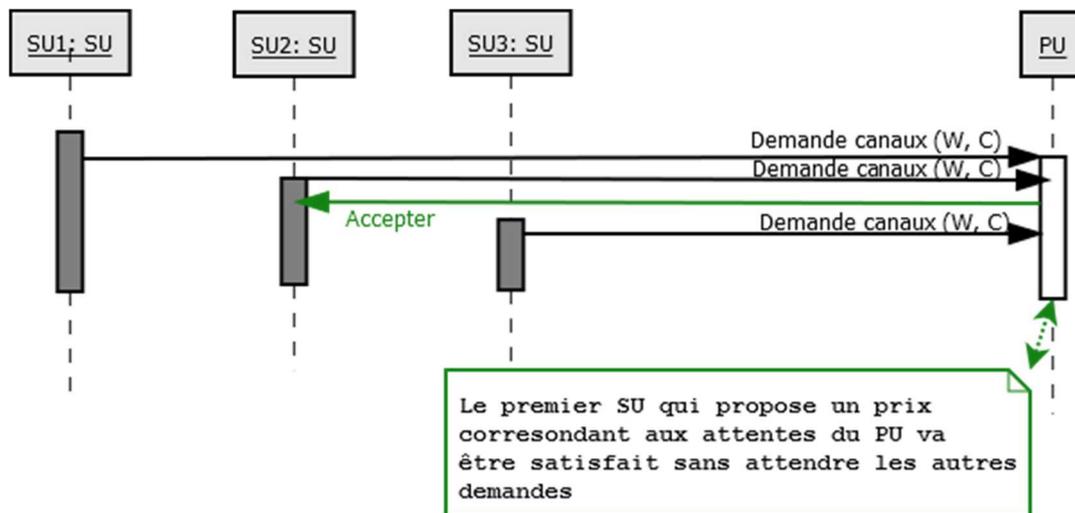


Figure 29: Diagramme FIFO'

### III.5 Comportement basé sur les méthodes multicritères

En effet, les mécanismes d'enchères récents ne sont plus limités au prix seulement mais sont caractérisés par d'autres attributs comme la qualité de l'objet, la quantité... Parmi les extensions les plus récentes, on peut citer les enchères multi-attributs. Ce domaine de recherche prometteur se situe à l'intersection entre la « Théorie des enchères » et l'« Analyse multicritère ».

Notre proposition dans le cadre de ce travail est basée sur une négociation multicritères, car nous nous sommes centrés sur plusieurs critères de négociation, ce qui nous a poussés à étudier plusieurs algorithmes et finalement à opter pour celui du TOPSIS, qui mène à une négociation optimisée et à un résultat efficace.

Dans ce scénario, nous avons utilisé une organisation à base de coalitions. Une coalition est une alliance entre les utilisateurs primaires ou secondaires en vue d'élire un utilisateur principal.

#### III.5.1 Utilisation des CPU

Dans un premier temps, nous avons étudié le cas où nous avons intégré la notion de coalition du côté des PU seulement. En effet, à l'intérieur de chaque coalition, il y a des agents PU qui proposent des canaux libres à la vente, sur lesquels les agents SU peuvent enchérir. En effet, nous avons introduit des agents coalition CPU (Coalition Primary User) qui vont être cet intermédiaire entre les utilisateurs primaires et l'utilisateur secondaire.

Le CPU joue le rôle du coordinateur pour l'ensemble des PU présents dans sa portée. L'objectif est d'aboutir à une meilleure complexité en nombre de messages échangés, également à un gain de temps important de réponse côté SU.

La figure 30 est un schéma général représentant la négociation entre les utilisateurs primaires et secondaires en utilisant des techniques multicritères avec les agents de coalitions dans le

contexte de la radio cognitive. Avec  $n$  pour le nombre de SU,  $m$  pour le nombre de CPU et  $n'$  pour le nombre de PU sachant que  $m < n'$ .

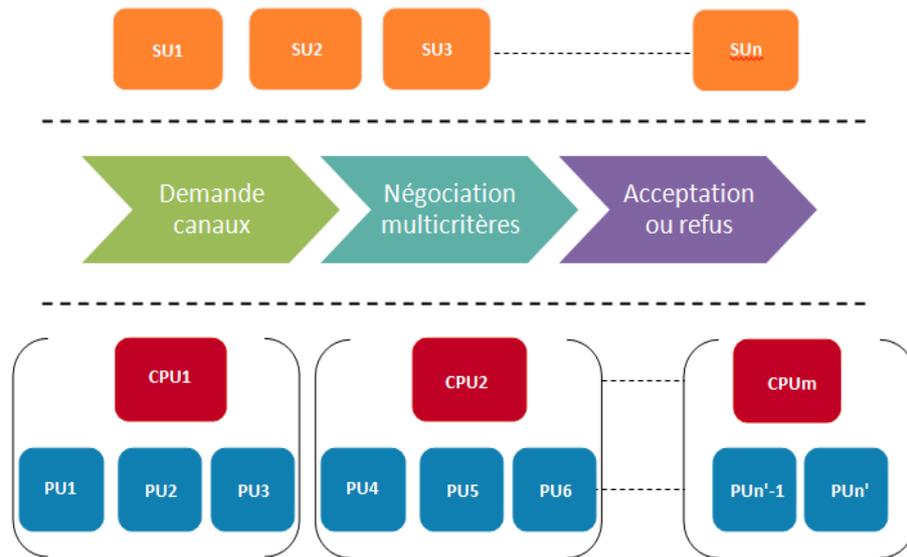


Figure 30: Architecture basée sur les techniques de décision multicritères à base d'agents coalitions

#### *a Topologie du réseau utilisé*

Nous avons opté pour un type spécifique de réseau, celui des réseaux ad-hoc pour son architecture sans infrastructure et sa facilité d'adaptation.

Nous supposons que les PU sont répartis sur des zones géographiques bien précises et qu'ils ne changent pas de zone pendant la négociation. Autrement dit, chaque agent de coalition regroupe les PU qui se situent dans sa zone géographique selon un critère de regroupement par rapprochement géographique. Le CPU sera l'intermédiaire entre le SU et les PU.

Etant donné qu'un nombre important de PU rend les négociations fastidieuses vis-à-vis du SU, nous avons décidé d'implémenter des CPU. Chaque CPU détient, en permanence et en temps réel, l'ensemble des informations relatives à l'ensemble des PU présents à l'intérieur de sa sphère (agent Géolocalisation). Par conséquent, le SU n'aura pas à négocier avec tous les PU mais uniquement avec les CPU.

Dans notre cas, le SU et les CPU négocient leur accord sur une base de multiples critères tels que le prix, le nombre de canaux, ainsi que le temps d'allocation. Cette multitude de paramètres nous a conduits à introduire une méthode adéquate qui est le TOPSIS.

La figure 31 nous montre que le SU va initier des négociations avec les CPU qui possèdent l'ensemble des informations sur les paramètres des PU présents. Chaque CPU applique l'algorithme TOPSIS pour choisir l'offre la mieux adaptée au besoin du SU, puis envoie à ce dernier l'offre désignée. Quant au SU, il aura à réceptionner à son tour les offres sélectionnées en appliquant l'algorithme TOPSIS pour aboutir à un choix optimal.

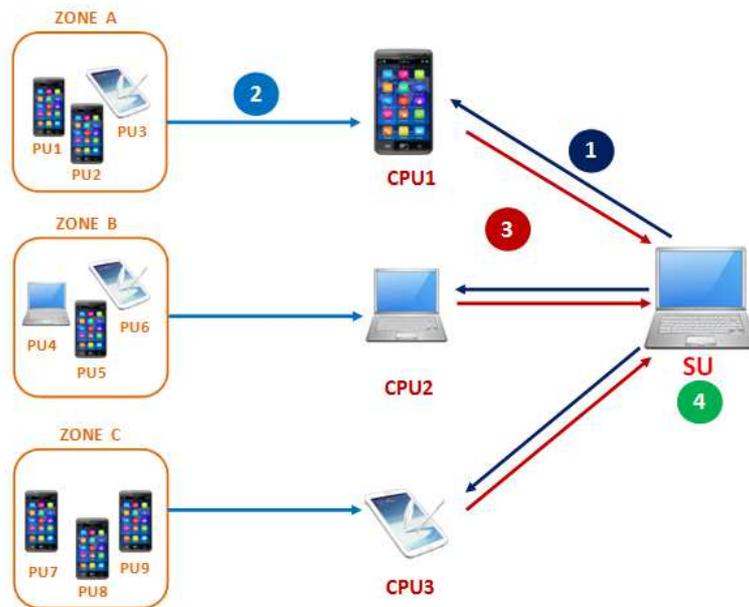


Figure 31: Scénario proposé

<b>1</b>	Le SU contacte les CPU pour leur signaler le nombre de canaux dont il a besoin.
<b>2</b>	Chaque CPU sélectionne la meilleure offre parmi celles présentes dans sa liste en appliquant l'algorithme TOPSIS.
<b>3</b>	Chaque CPU renvoi au SU l'offre sélectionnée.
<b>4</b>	Le SU reçoit toutes les réponses des CPU et en appliquant l'algorithme TOPSIS, il choisit la meilleure offre parmi celles reçues.

Tableau 7: fonctionnement du scénario proposé

La figure qui suit représente un diagramme de séquence pour l'algorithme utilisé pour la décision multicritères. Ce diagramme permet de décrire les actions qui se passent entre les différents utilisateurs.

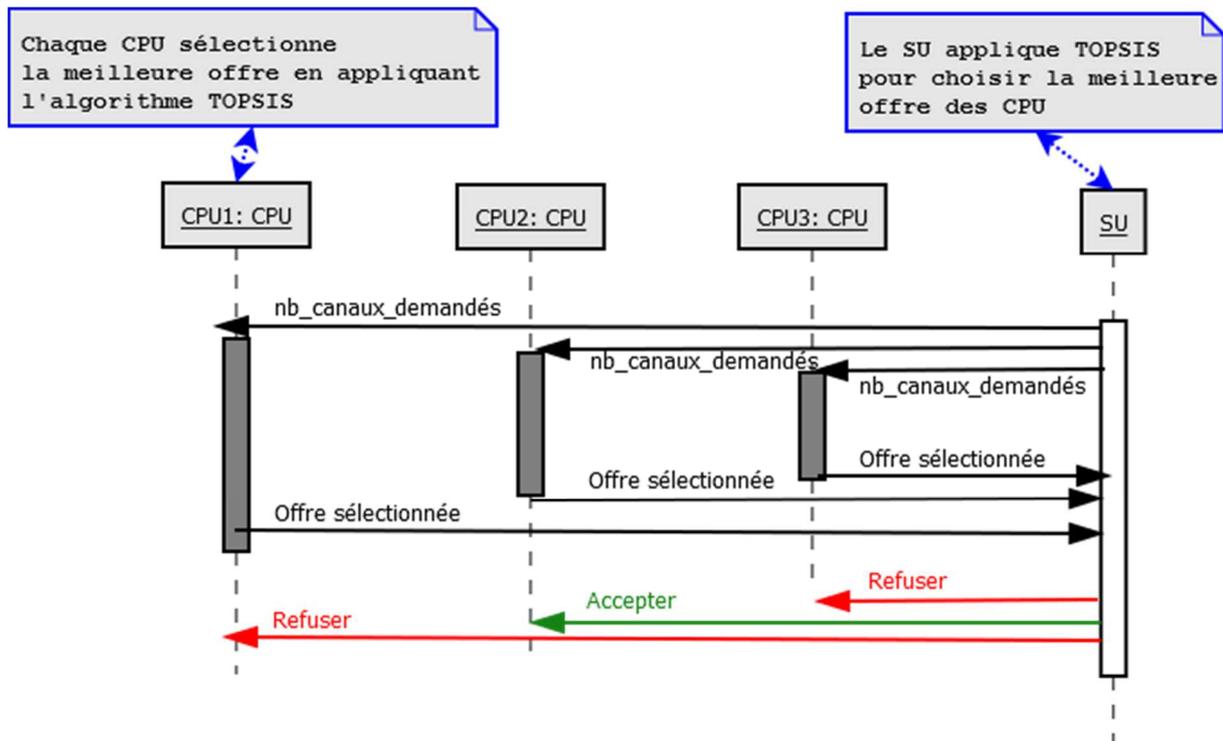


Figure 32: Diagramme de séquence TOPSIS

La 33 décrit le comportement du PU lors de la négociation à base de la décision multicritères en utilisant l'algorithme TOPSIS. Le PU reçoit les demandes du CPU chargé de la zone géographique, si le PU peut satisfaire la demande du SU alors il envoie une offre au CPU qui se chargera de la transmettre au SU.

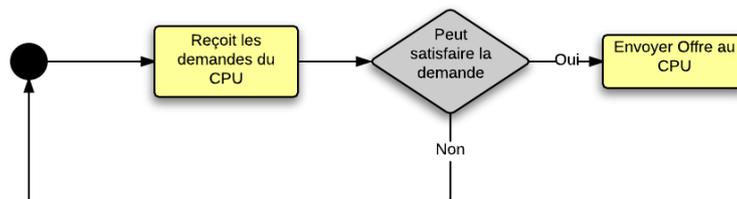


Figure 33: Comportement du PU lors de l'application de l'algorithme TOPSIS

La figure 34 montre le comportement de l'agent SU dans la négociation à base de TOPSIS. En premier lieu, le SU envoie la demande aux différents CPU et ensuite attend la réponse. S'il reçoit une seule offre, il la prend et utilise les canaux proposés sinon s'il reçoit plusieurs offres de la part des CPU, il applique l'algorithme TOPSIS pour choisir la meilleure offre et utiliser les canaux.

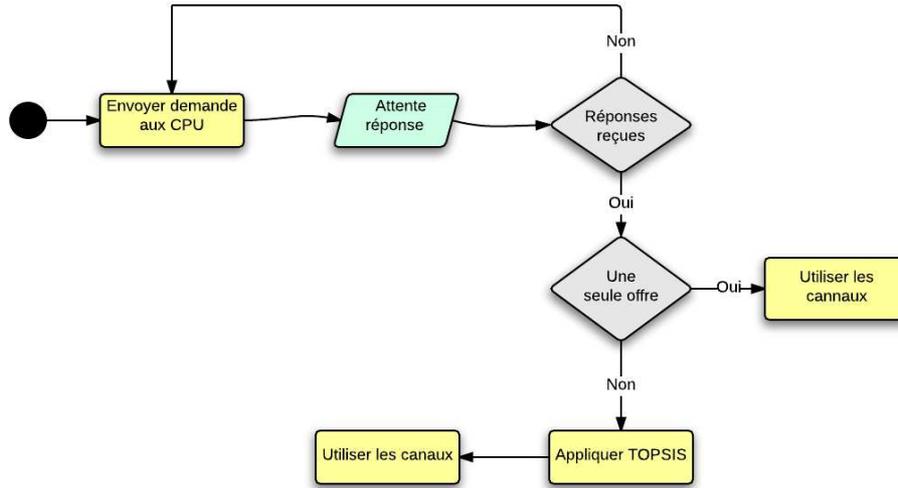


Figure 34: Comportement du SU lors de l'application de l'algorithme TOPSIS

Comme nous le voyons dans la figure 35, le CPU reçoit les différentes demandes des SU et les envoie à son tour aux PU présents dans la même zone géographique. S'il reçoit une seule offre alors il l'envoie au SU sinon s'il reçoit plusieurs offres en même temps, il va appliquer l'algorithme TOPSIS pour choisir la meilleure offre parmi celles proposées et ensuite envoie l'offre sélectionnée au SU.

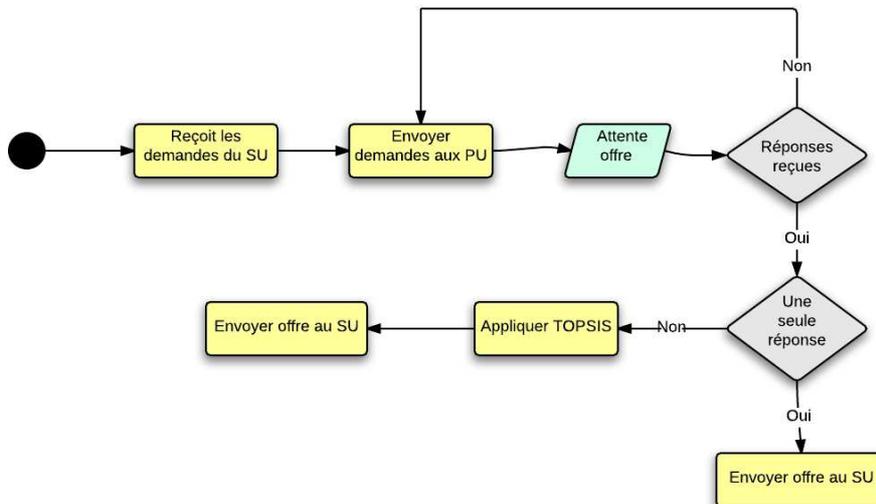


Figure 35: Comportement du CPU lors de l'application de l'algorithme TOPSIS

### III.5.2 Utilisation des CPU et CSU

Dans cette partie du chapitre, nous allons décrire le comportement des agents de l'approche proposée qui consiste à intégrer la notion de coalitions du côté des SU également. Il y a des agents CPU du côté des PU et des agents CSU (Coalition Secondary User) du côté des SU qui jouent le rôle de coordinateur pour l'ensemble des utilisateurs.

En effet, nous avons regroupé les agents PU qui proposent des canaux libres à la vente dans des coalitions et les agents SU qui demandent des canaux pour garantir la qualité de service de leurs applications dans d'autres coalitions.

Dans cette étape, la négociation se fera entre les CPU et les CSU à base de méthodes multicritères. Dans ce cas, il y aura certainement beaucoup plus de messages échangés par rapport au cas précédent (CPU seulement) car on ajoute l'interaction entre les CSU et les SU.

Alors pour palier à ce problème et réduire le nombre de messages, nous proposons d'agréger les demandes des SU en un seul message qui sera envoyé au CPU. L'objectif du CSU est d'obtenir la meilleure offre parmi celles disponibles et l'objectif du CPU est de maximiser le gain en termes de prix et de SU satisfaits.

Nous supposons que les PU et SU sont répartis sur des zones géographiques bien précises et qu'ils ne changent pas de zone pendant la négociation. Autrement dit, chaque agent CPU regroupe les PU qui se situent dans sa zone géographique et chaque CSU regroupe les SU qui se situent dans sa zone géographique.

La figure 36 est un schéma général représentant la négociation entre les utilisateurs primaires et secondaires en utilisant des techniques multicritères avec les agents de coalitions dans le contexte de la radio cognitive. Avec  $n$  pour le nombre de SU,  $m'$  pour le nombre de CSU,  $n'$  pour le nombre de PU et  $m$  pour le nombre de CPU, sachant que  $m < n'$  et  $m' < n$ .

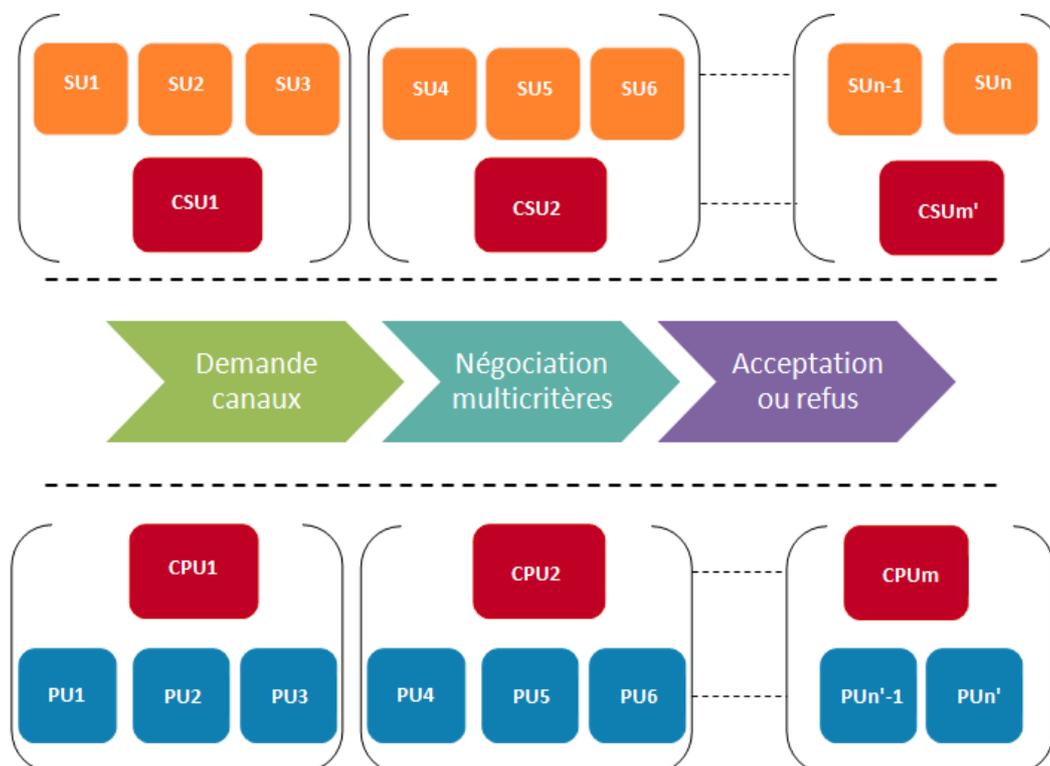


Figure 36: Architecture à base d'agents coalitions CPU et CSU

La figure 37 montre le comportement de l'agent SU dans la négociation à base de coalitions. En premier lieu, le SU envoie la demande au CSU et ensuite il reste en attente jusqu'à réception d'une réponse de la part du CSU pour pouvoir utiliser les canaux.

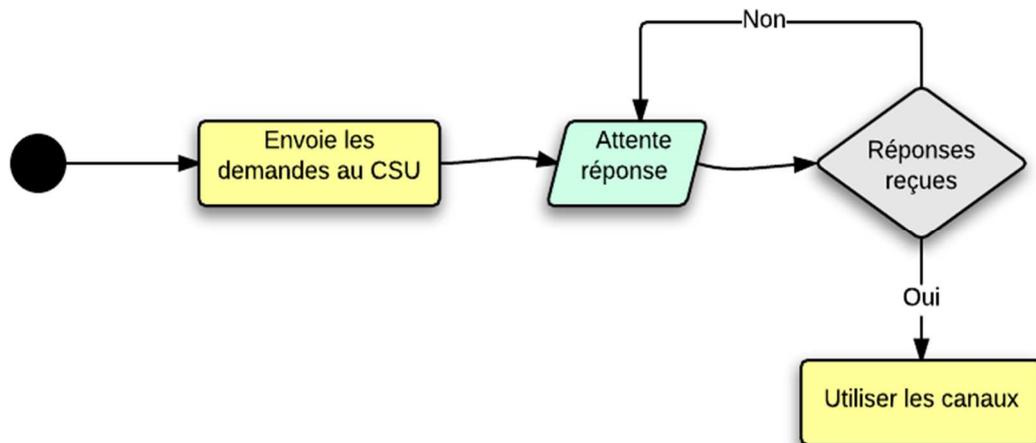


Figure 37: Comportement du SU lors de l'utilisation des coalitions

Comme nous le voyons dans la figure 38, le CPU reçoit les différentes demandes des CSU. Sur la base des offres disponibles coté CPU, ce dernier applique l'algorithme TOPSIS pour choisir la meilleure offre sans contacter les PU pour réduire le nombre de messages. Le CPU envoie ensuite l'offre sélectionnée au CSU.

A ce moment, le CPU attend une confirmation de la part du CSU pour lui envoyer les canaux. S'il reçoit une seule réponse de la part du CSU, il envoie directement les canaux sinon s'il reçoit plusieurs confirmations il choisit le CPU le plus offrant car ce dernier cherche à maximiser ses gains et il envoie les canaux à la fin.

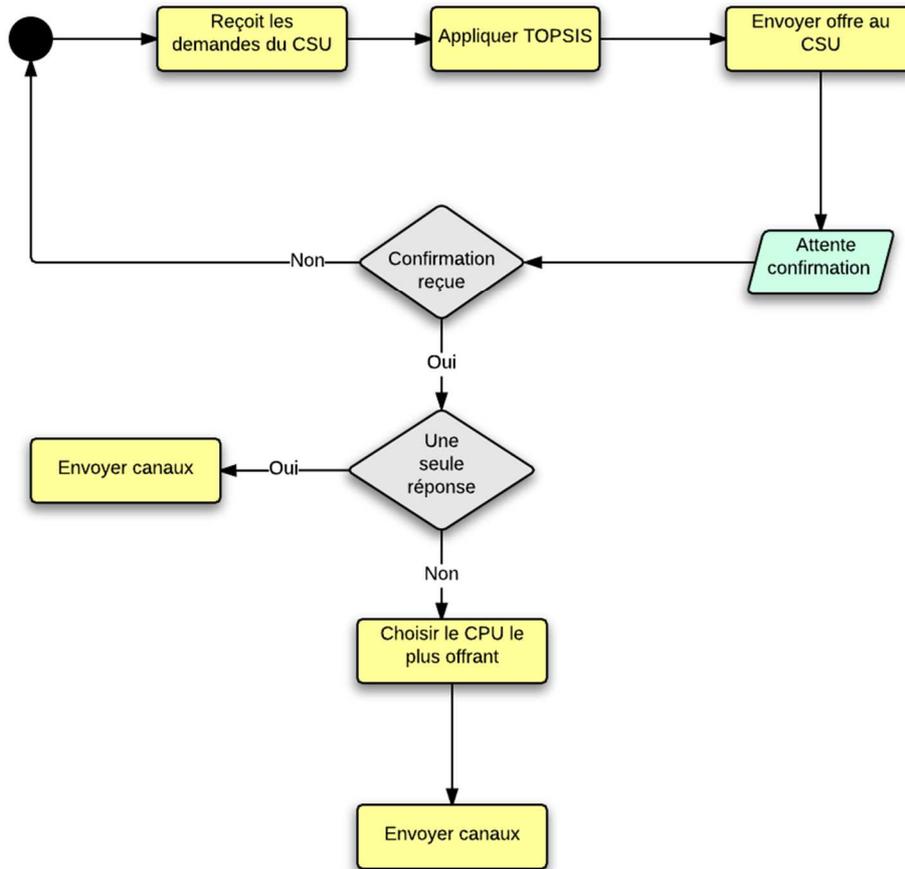


Figure 38: Comportement du CPU lors de l'utilisation des coalitions

Le CSU reçoit la demande de la part du SU, ensuite envoie cette demande au CPU et reste en attente jusqu'à réception d'une réponse. Il va appliquer ensuite l'algorithme TOPSIS pour choisir la meilleure offre parmi celles reçues. Après cela, le CSU envoie un message de confirmation au CPU comme quoi il accepte son offre et il veut bien utiliser les canaux qu'il propose. La figure 39 décrit ce comportement.

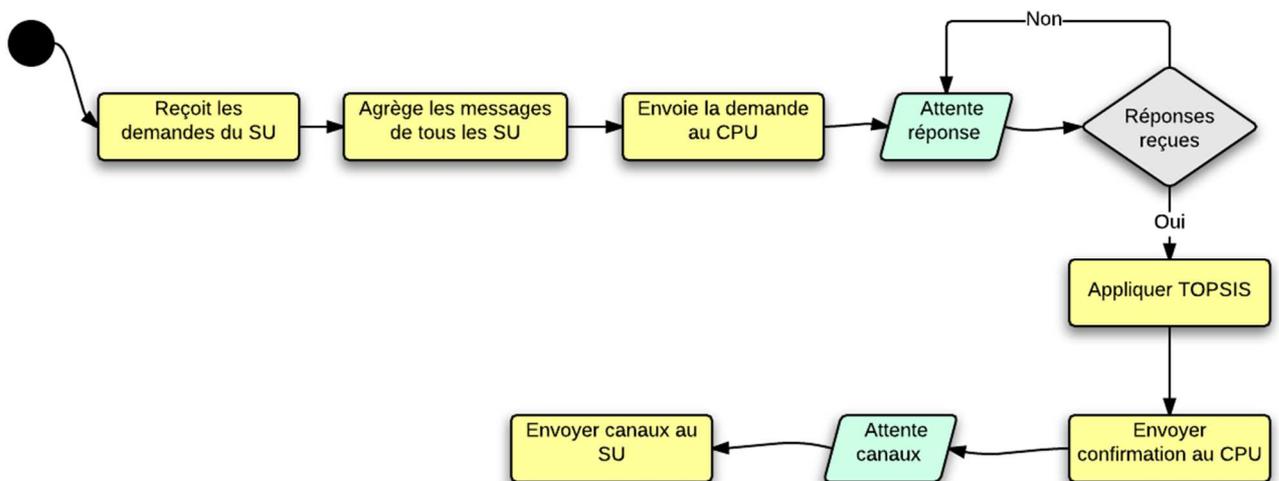


Figure 39: Comportement du CSU lors de l'utilisation des coalitions

### a Scénario

Chaque CPU applique localement TOPSIS et envoie les résultats à tous les CSU de la configuration. Par la suite, chaque CSU applique TOPSIS également pour trouver la solution finale et renvoie les résultats au CPU en question.

Si le PU est sollicité par un seul SU, le CPU responsable de la coalition du PU en question va faire l'allocation des canaux disponibles. Sinon si le PU est sollicité par plusieurs SU, il doit choisir la configuration qui lui permet de maximiser le gain en premier lieu sinon viser à maximiser le nombre de SU utilisant ses canaux.

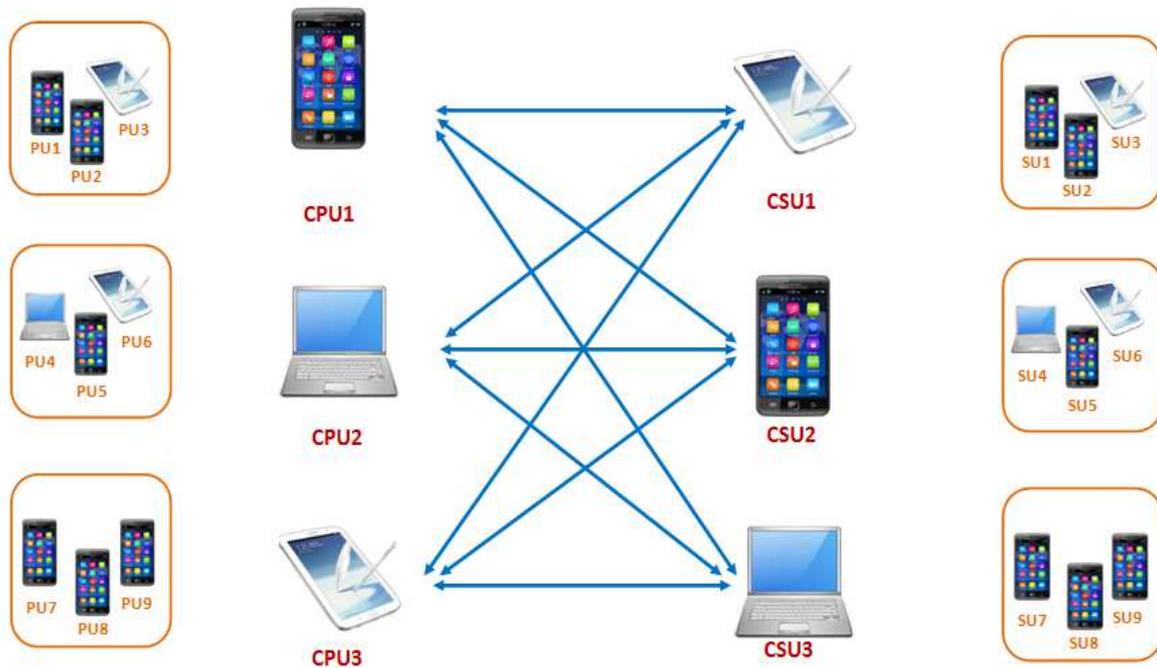


Figure 40: Scénario CSU avec CPU

### b Exemple illustratif

Dans la table de CPU1, il y a le PU1 qui a 5 canaux libres. S'il reçoit les demandes suivantes en terme de nombre de canaux (3, 2, 1) de la part de (CSU1, CSU2, CSU3) respectivement. Le CPU va satisfaire CSU1 avec 3 canaux et CSU2 avec 2 canaux. En d'autres termes, il va vendre l'ensemble de ses canaux. Dans ce cas là il va appliquer la programmation dynamique pour maximiser ses gains.

Avec le même jeu de donnée mais avec 3 canaux libres chez le PU1, le CPU a deux possibilités; satisfaire CSU1 avec les 3 canaux ou bien satisfaire CSU 2 avec 2 canaux et CSU3 avec 1 canal. Dans les deux possibilités, le CPU1 aura le même gain en termes de prix car il aura vendu le même nombre de canaux. Par contre, le deuxième objectif du CPU1 est de satisfaire un nombre maximal de SU donc dans notre exemple, le CPU1 va choisir la deuxième possibilité et donc satisfaire 2 SU.

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude sur l'utilisation des systèmes multi-agents dans le contexte de la radio cognitive. Nous avons ainsi étudié les différentes propriétés d'un SMA au sein d'un réseau RC, ensuite nous avons détaillé l'architecture que nous avons proposée. Cette architecture est divisée en trois niveaux (physique, cognitif, comportemental).

Le niveau physique traite l'aspect équipement, le niveau cognitif traite l'aspect apprentissage et décision. Enfin, le niveau comportemental où nous avons proposé des approches à base de théorie d'enchères, de décision multicritères et de formation de coalitions.

Dans l'approche basée sur la théorie des enchères, nous avons utilisé deux types d'enchères: à un seul tour et à plusieurs tours. Nous avons ensuite étudié FIFO' une autre technique que nous avons proposé.

Dans l'approche basée sur la décision multicritères, nous avons proposé un scénario et une topologie. Nous avons utilisé TOPSIS un algorithme d'aide à la décision multicritères pour résoudre le problème d'encombrement de spectre.

Nous avons introduit également la notion de coalition dans les approches basées sur les méthodes d'aide à la décision afin de regrouper les utilisateurs primaires et secondaires et réduire le nombre de messages échangés.

Dans toutes les approches que nous avons proposées, nous avons donné des diagrammes de séquence pour détailler les différentes étapes du processus. Nous avons ainsi donné des organigrammes pour expliquer le comportement des utilisateurs primaires et secondaires.

Dans le chapitre suivant, nous allons valider l'architecture que nous avons proposée avec des expérimentations à base de la théorie des enchères et de décision multicritères.

# **CHAPITRE IV**

## **Expérimentations et résultats**

## IV. CHAPITRE IV: Expérimentations et résultats

### IV.1 Introduction

Afin de valider l'architecture à trois niveaux proposée dans le chapitre précédent, nous allons appliquer différents algorithmes sur les différents scénarios possibles pour étudier les comportements des utilisateurs primaires et secondaires.

Avant d'entamer cette partie, nous tenons à préciser que tous les protocoles proposés ont été développés avec le langage JAVA sous l'environnement de développement intégré Netbeans.

Dans ce chapitre, nous proposons des scénarios différents, dans chacun d'eux nous montrons les différentes expérimentations menées et nous discutons les résultats obtenus. En premier lieu, nous allons décrire le cas où il y a un seul PU contre plusieurs SU. Dans cette partie, nous avons implémenté les algorithmes gloutons, la programmation dynamique et la méthode 'FIFO' et ensuite nous avons fait une comparaison entre les résultats obtenus. Nous avons également comparé l'utilisation des enchères à un seul tour et celles à plusieurs tours.

Ensuite, nous allons étudier le cas où il y a un seul SU avec plusieurs PU. Dans cette partie du chapitre, nous avons utilisé deux méthodes. La première s'appuyant sur la théorie des enchères et la deuxième sur la décision multicritères où nous avons introduit également la notion de coalitions.

Enfin, nous avons généralisé tous les résultats obtenus en étudiant le cas où il y a plusieurs SU avec plusieurs PU. Dans ce cas, nous avons utilisé les méthodes d'aide à la décision avec des coalitions des deux cotés (PU et SU). Nous avons aussi introduit la notion d'agrégation pour réduire le nombre de messages échangés.

### IV.2 Expérimentations

Dans cette section, nous décrivons les approches proposées pour la négociation entre les utilisateurs primaires et secondaires dans un environnement radio cognitive à base de multi-agents.

En effet, il existe de multiple types de négociation: "Un à un", "Un à plusieurs", "Plusieurs à un" et "Plusieurs à plusieurs". Le tableau 8 ci-dessous décrit les différents schémas que nous allons utiliser pour résoudre le problème d'encombrement du spectre.

PU/SU	Un (1)	Plusieurs (n)
Un (1)		<b>Schéma 1</b>
Plusieurs (n)	<b>Schéma 2</b>	<b>Schéma 3</b>

Tableau 8: Types de négociation

Le premier cas ne pose aucun problème car en effet, il n'y a qu'un seul PU et qu'un seul SU donc pas besoin de négociation. Ce qui fait que nous allons traiter les 3 cas d'utilisation non grisés dans le tableau 8.

Dans ce qui suit, nous supposons que chaque utilisateur est doté d'un agent. Pour simuler les interactions entre les différents agents, nous avons opté pour la plateforme JADE (Java Agent Development Framework) qui est développée en JAVA et fonctionne sous tous les systèmes d'exploitation [Annexe].

### IV.3 Schéma n° 1 « un à plusieurs »: un PU à plusieurs SU

Dans un premier temps, nous avons porté notre attention sur un type particulier de négociation « un à plusieurs » c'est-à-dire qu'il y a un seul PU qui partage son spectre et plusieurs SU qui ont besoin de bandes libres pour assurer la qualité de leur application. La figure 41 montre le schéma utilisé et la figure 42 illustre le scénario qui sera traité dans cette partie.

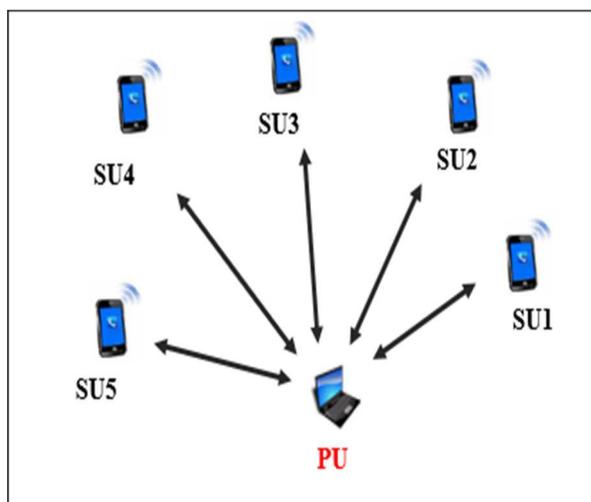


Figure 41: Un PU et plusieurs SU

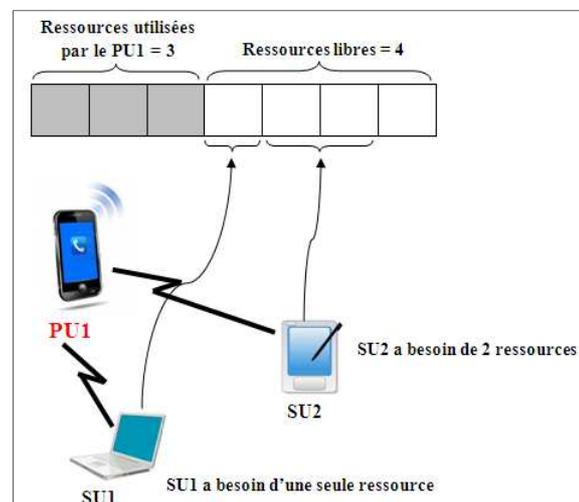


Figure 42: Scénario proposé

Dans notre scénario, l'objectif des SU est de trouver les meilleurs canaux libres en termes de prix et de qualité pour assurer continuellement une très bonne QoS. Cependant, l'objectif du PU est de maximiser son gain c'est à dire qu'il va offrir les canaux libres au plus offrant. La négociation entre les SU et le PU se fera dans un premier temps sur un seul critère qui est le prix.

Le scénario présenté ressemble beaucoup au problème du sac à dos (*Knapsack problem*) et pour résoudre ce genre de problèmes, les informaticiens ont souvent eu recours à la programmation dynamique ou aux algorithmes gloutons. En effet, l'algorithme glouton ne va pas toujours donner la solution optimale mais a une complexité plus faible que la programmation dynamique et permet généralement d'obtenir une solution correcte pour des problèmes variés.

Pour les simulations, nous avons utilisé les trois méthodes (enchère avec algorithme glouton, avec programmation dynamique et FIFO) pour ensuite comparer les résultats obtenus.

### IV.3.1 Simulation des enchères à enveloppes scellées avec programmation dynamique

Pour être plus précis, nous avons choisi deux types d'enchères dans ce scénario : un s'effectuant en un seul tour tel que les enchères à enveloppes scellées au premier prix et un autre s'effectuant en plusieurs tours tel que les enchères anglaises.

Pour résoudre le problème de l'allocation du spectre, nous proposons d'utiliser la programmation dynamique qui est une technique algorithmique pour optimiser des sommes de fonctions monotones croissantes sous contrainte. Cette technique s'applique à des problèmes d'optimisation dont la fonction objective se décrit comme « la somme de fonctions monotones croissantes des ressources ». Dans notre cas, l'algorithme proposé attribue les canaux aux utilisateurs les plus offrants.

Nous rappelons que :

nb : le nombre de SU.

m : le nombre de canaux libres coté PU.

W : tableau de taille n, W[i] est le nombre de canaux demandés par SU<sub>i</sub>.

C : tableau de taille n, C[i] représente le prix proposé pour W[i] par SU<sub>i</sub>.

La fonction monotone croissante à optimiser est :  $\text{Max} \sum_{i=0}^{nb-1} C[i]$

La contrainte est :  $\sum_{i=0}^{nb-1} W[i] \leq m$

#### a Enchères à enveloppes scellées au premier prix

L'initiateur commence l'enchère et chaque participant soumet une offre sous enveloppe ou électroniquement, à un tour unique, sans connaître les offres des autres. Le participant qui a fait la plus grande offre gagne l'objet et paye le montant de son offre.

La figure 43 ci-dessous montre l'algorithme que nous avons proposé pour résoudre ce type d'enchères.

---

**Algorithm 1** Enchères à enveloppes scellées au premier prix

---

```

1: function COUT(W,C,m)
2:   nb ← C.length
3:   for j=0 to m do
4:     tab[0][j] ← 0
5:   for i=1 to nb do
6:     for j=0 to m do
7:       if j ≤ W[i-1] then tab[i][j] ← tab[i-1][j]
8:       else tab[i][j] ← max(tab[i-1][j], C[i-1]+tab[i-1][j-W[i-1]])
9:   return tab[nb][m]=0

```

---

Figure 43: Algorithme pour les enchères à enveloppes scellées au premier prix

La figure 44 montre le résultat des différentes interactions possibles entre les utilisateurs lors des enchères à un seul tour avec programmation dynamique.

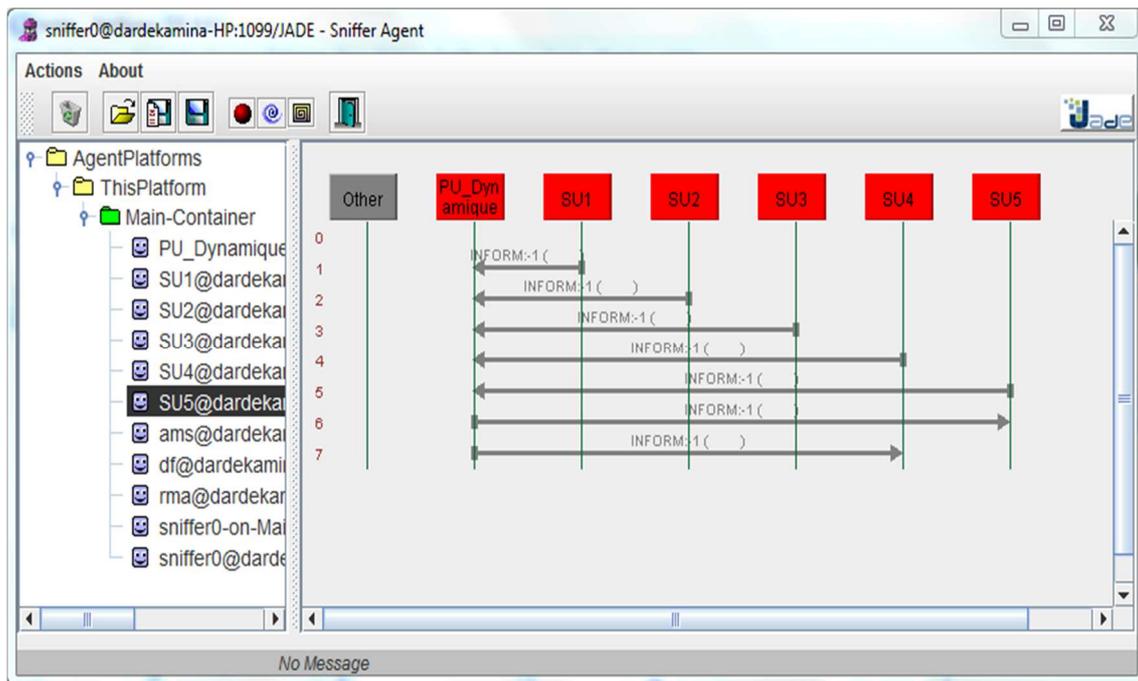


Figure 44: Agent Sniffer pour l'enchère à un seul tour avec programmation dynamique

### *b Enchères anglaises*

L'initiateur commence l'enchère d'habitude par l'annonce d'un prix de réservation (le prix minimal pour lequel il est d'accord pour vendre l'objet). Chaque participant annonce publiquement son offre en plusieurs tours successifs. Quand aucun participant ne veut augmenter son offre, l'enchère s'arrête et le participant ayant fait la plus grande offre gagne l'objet au prix de son offre.

Dans ce qui suit, nous allons noter les variables principales:

**nb** : le nombre de SU.

**W** : tableau de taille  $n$ ,  $W[i]$  est le nombre de canaux demandés par  $SU_i$ .

**C** : tableau de taille  $n$ ,  $C[i]$  représente le prix proposé pour  $W[i]$  par  $SU_i$ .

**max\_su**: prix maximal que peut offrir le SU.

**prix\_pu**: prix final offert.

Les autres variables secondaires telles que (max, nb\_bool, bool, max1) servent pour faire des tests et des comparaisons au sein de l'algorithme.

Pour les simulations, nous avons donné aux prix proposés par les SU ( $C[i]$ ) des valeurs aléatoires comprises dans l'intervalle  $[0..100]$  et pour les prix maximaux que peuvent offrir les SU ( $max\_su$ ) des valeurs aléatoires comprises dans l'intervalle  $[0..1000]$ .

Nous avons varié le nombre de SU ( $nb$ ) et le nombre de canaux demandés ( $W[i]$ ) de 0 à 10 afin d'obtenir des résultats plus concrets.

La figure suivante montre l'algorithme que nous avons proposé pour ce type d'enchères.

---

**Algorithm 2** Enchères anglaises
 

---

```

1: function ANGLAISE
2:   for i=0 to nb-1 do
3:      $max\_su[i] \leftarrow random * 1000$ 
4:     if  $max\_su[i] > max$  then
5:        $max \leftarrow max\_su[i]$ 
6:      $C[i] \leftarrow random * 100$ 
7:      $C[i] \leftarrow C[i]/W[i]$ 
8:      $bool[i] \leftarrow 1$ 
9:   while  $nb\_bool \neq 0$  do
10:    for i=0 to nb-1 do
11:      if  $bool[i]=0$  then
12:        continue
13:      if  $C[i] > max\_su$  then
14:        if  $bool[i]=1$  then
15:           $C[i] \leftarrow max\_su[i]$ 
16:           $bool[i] \leftarrow 0$ 
17:         $nb\_bool \leftarrow nb\_bool - 1$ 
18:      if  $C[i] > max1$  then
19:         $max1 \leftarrow C[i]$ 
20:    return prix_pu
  
```

---

Figure 45: Algorithme enchères anglaises

*c* **Comparaison entre les deux types d'enchères**

Nous avons implémenté les deux algorithmes coté PU et ensuite comparé les résultats obtenus sachant que nous avons testé les deux algorithmes en supposant qu'il y a 10 SU au même endroit.

- **Comparaison en termes de temps d'exécution**

La figure 46 montre que le temps d'exécution moyen des enchères à plusieurs tours est très grand par rapport à celles qui se font en un seul tour.

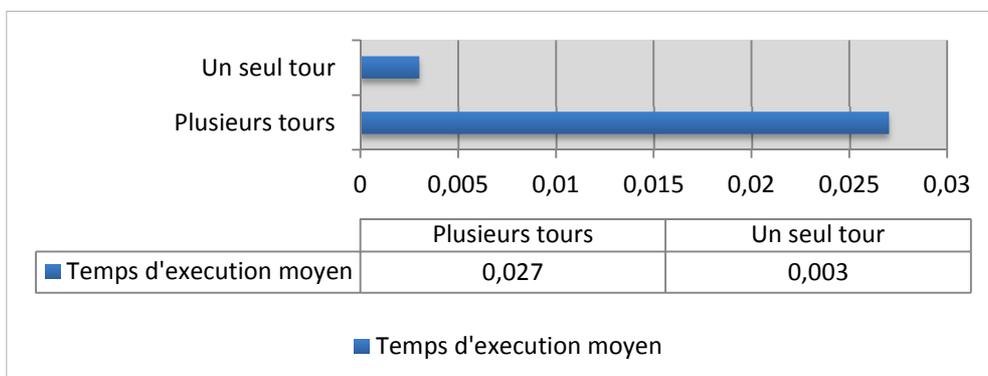


Figure 46: Comparaison entre les deux algorithmes en termes de temps

- **Comparaison en termes d'efficacité**

Dans notre cas, quand on parle d'efficacité, on parle de nombre de SU satisfaits. Pour cela, nous avons comparé les deux algorithmes et nous remarquons que les résultats obtenus sont identiques.

La figure 47 ci-dessous montre l'impact des enchères sur le nombre de SU satisfaits. On voit très bien que quelque soit le nombre de canaux disponibles chez le PU, le nombre de SU satisfaits reste le même avec les deux méthodes.

Nous avons comparé aussi l'utilisation des enchères avec le cas simple où le PU satisfait la première demande reçue en fonction de ses canaux libres. On remarque que le nombre de SU satisfaits est toujours supérieur par rapport à celui obtenu sans les enchères.

Le jeu de données que nous avons utilisé est :

$nb=5$ ,  $C = \{10, 20, 40, 120, 260\}$  et  $W = \{7, 5, 3, 2, 1\}$ .

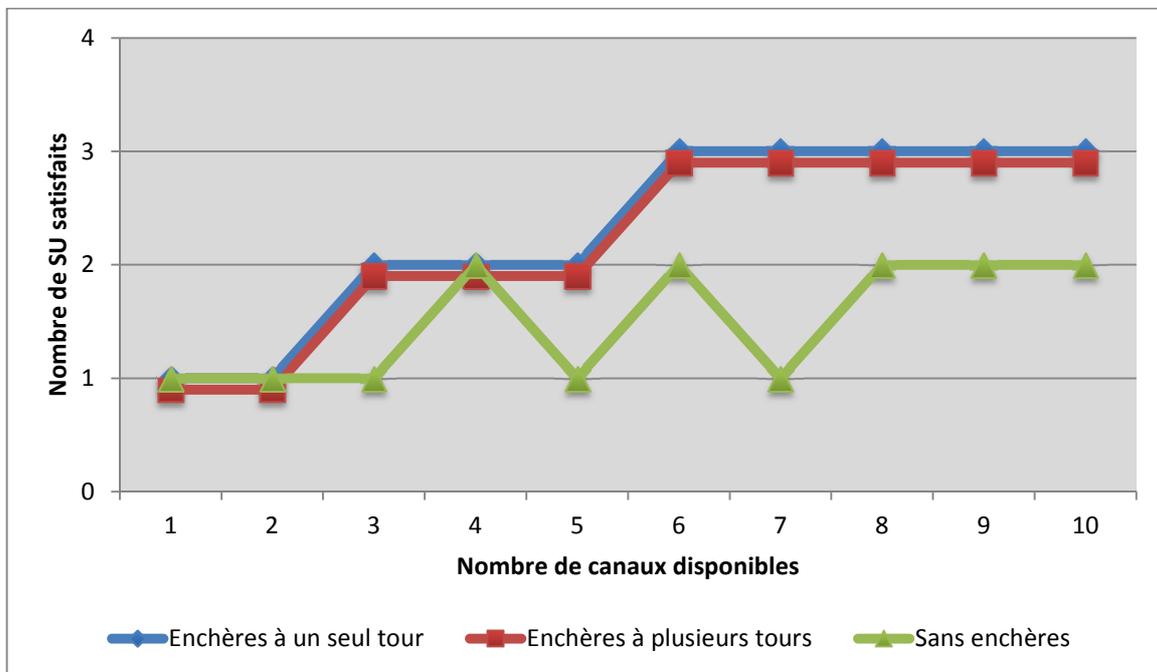


Figure 47: Impact des enchères sur le nombre de SU satisfaits

Pour connaître le nombre de SU qui peut être satisfait dans une période donnée de temps ( $1\text{min}=60\text{s}$ ), nous avons fait une comparaison entre l'utilisation des deux algorithmes précédents (enchères à 1 tour, enchères à n tours) avec la méthode FIFO (First In First Out) qui consiste à satisfaire la première demande reçue par le PU.

Pour établir cette comparaison, nous avons supposé que le temps d'utilisation de chaque canal est de 10s. En plus du temps d'exécution et du temps d'utilisation, il faut savoir aussi que le temps nécessaire pour exploiter un canal ( $T$ . établissement) est de 5 secondes en moyenne [95][96].

**$T$ . requis =  $T$ . exécution +  $T$ . établissement +  $T$ . utilisation**

Le jeu de données que nous avons utilisé est :

$m=4$ ,  $nb=4$ ,  $C = \{44, 94, 151, 97\}$  et  $W = \{3, 2, 1, 3\}$ .

La figure 48 montre qu'en 60s, 3 SU ont été satisfaits avec l'utilisation des deux méthodes d'enchères, cependant en utilisant la méthode FIFO; 2 SU seulement ont été satisfaits.

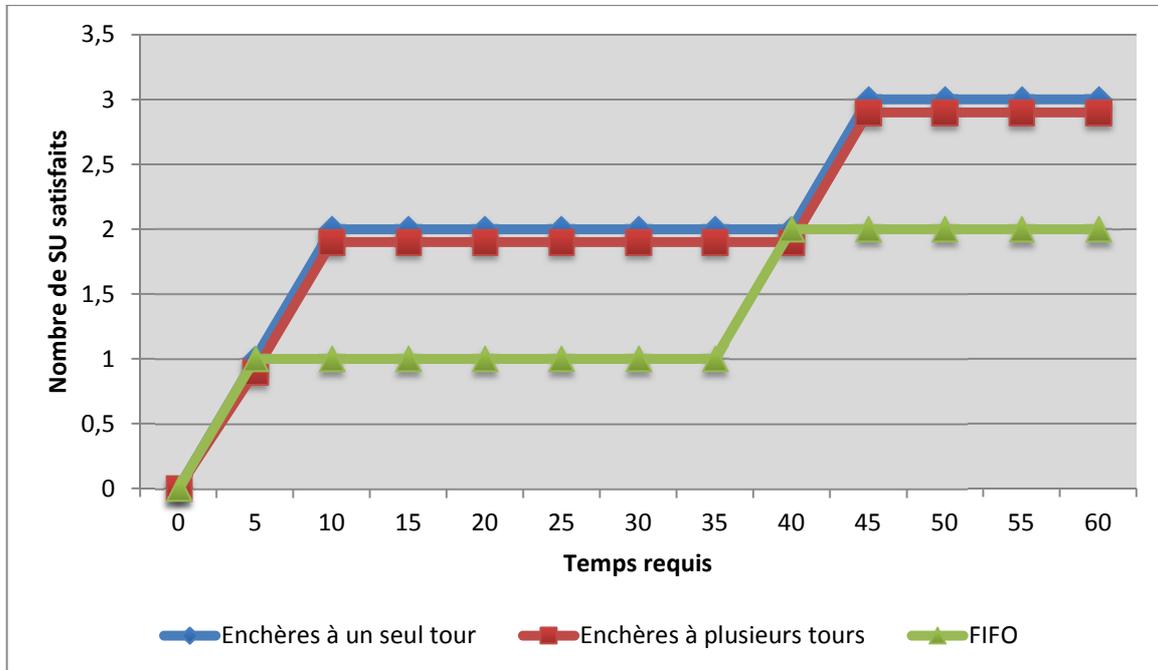


Figure 48: Impact des enchères sur le nombre de SU satisfaits

La figure 49 montre l'impact des enchères sur les gains obtenus par le PU.

Le jeu de données que nous avons utilisé est:

$nb=10$ ,

$C$  (un tour) =  $\{39, 51, 160, 59, 64, 145, 177, 53, 42, 106\}$ ,

$C$  (plusieurs tours) =  $\{286, 209, 141, 489, 3, 21, 671, 226, 622, 350\}$

et  $W = \{3, 2, 1, 3, 2, 1, 1, 2, 3, 1\}$ .

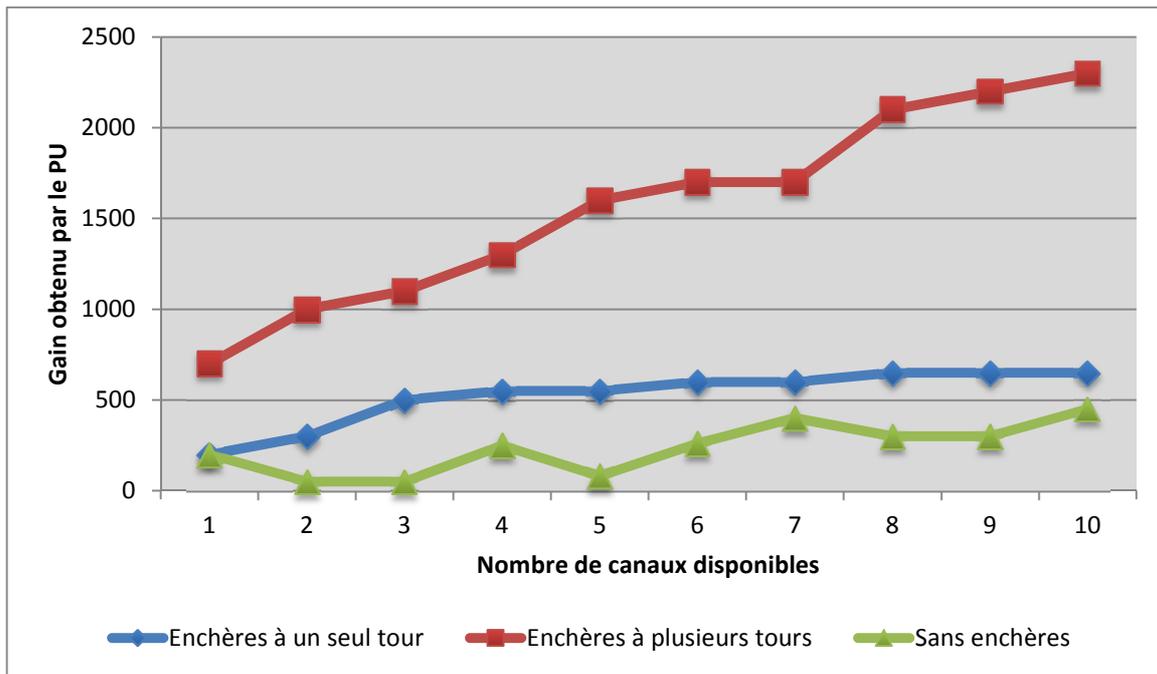


Figure 49: Impact des enchères sur les gains obtenus :

On remarque que l'utilisation des enchères à plusieurs tours est plus bénéfique pour le PU car ses gains sont beaucoup plus importants par rapport à l'utilisation des enchères à un seul tour ou l'utilisation de la technique FIFO.

#### *d Discussion*

Quelque soit le nombre de canaux demandés, le SU propose un prix pour la totalité des canaux demandés et donc c'est toujours celui qui peut offrir le plus qui gagne. C'est ce qui fait que l'efficacité des algorithmes reste la même vu qu'on satisfait le même nombre de SU.

Pour maximiser les gains du PU, il faut utiliser les enchères à plusieurs tours. Si on s'intéresse plutôt au nombre de SU satisfaits, il vaut mieux utiliser les enchères à un seul tour car la procédure est plus rapide surtout si on cherche à satisfaire des applications temps réel.

### **IV.3.2 Simulation des enchères à enveloppes scellées avec algorithme glouton**

D'après les résultats obtenus avec l'utilisation de la programmation dynamique, nous avons décidé d'appliquer les enchères à enveloppes scellées au premier prix qui s'effectuent en un seul tour dans tout ce qui suit.

La figure 50 montre le résultat de l'agent sniffer pour les enchères à enveloppes scellées avec algorithme glouton. Les agents SU envoient à l'agent PU des messages INFORM pour l'informer des prix proposés et le nombre de canaux dont ils ont besoin. L'agent PU envoie à son tour un message de confirmation à l'agent SU3 qui lui satisfait sa demande.

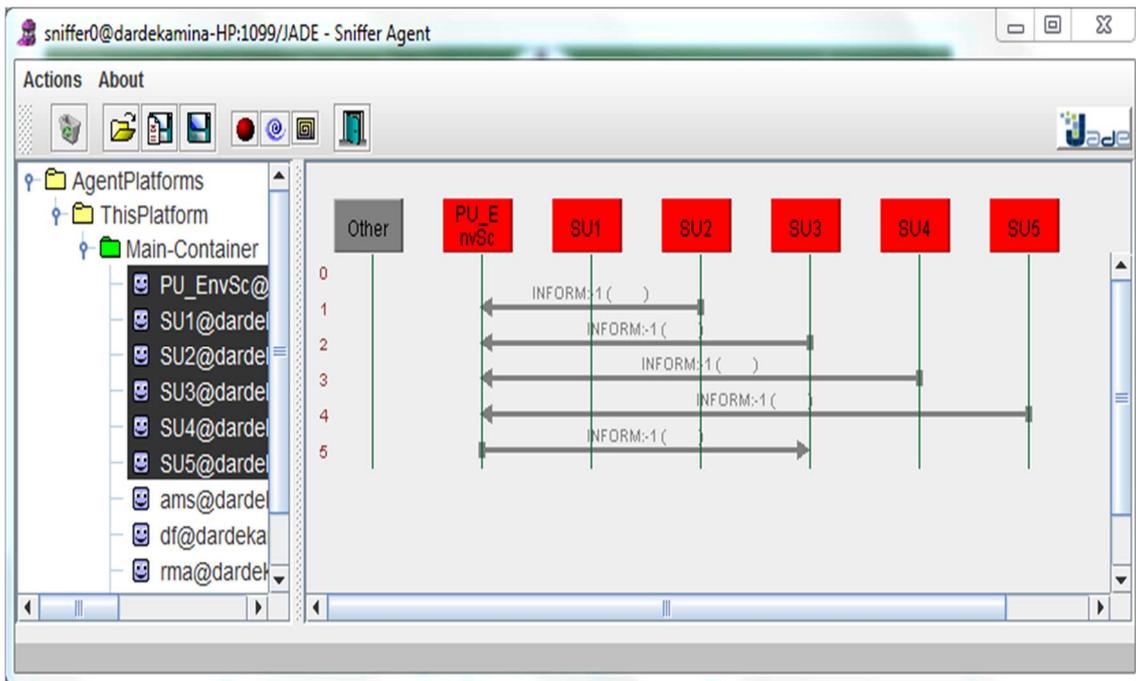


Figure 50: Agent Sniffer pour l'enchère à Enveloppe scellée avec algorithme glouton

### IV.3.3 Simulation FIFO'

Nous avons comparé les résultats obtenus précédemment avec ceux de la méthode FIFO' (FIFO mais sans blocage des demandes insatisfaites) décrite dans le chapitre III.

La figure 51 décrit les interactions entre les agents SU et l'agent PU qui utilise la technique FIFO' qui consiste à satisfaire la première demande reçue par le PU avec la contrainte  $\sum_{i=0}^{nb-1} W[i] \leq m$ .

Les agents SU envoient à l'agent PU des messages INFORM qui contiennent les prix proposés et le nombre de canaux demandés.

L'agent PU envoie un message de confirmation à l'agent SU3.

Les agents SU4 et SU5 envoient des messages INFORM à l'agent PU. Ces messages contiennent les prix proposés et le nombre de canaux demandés.

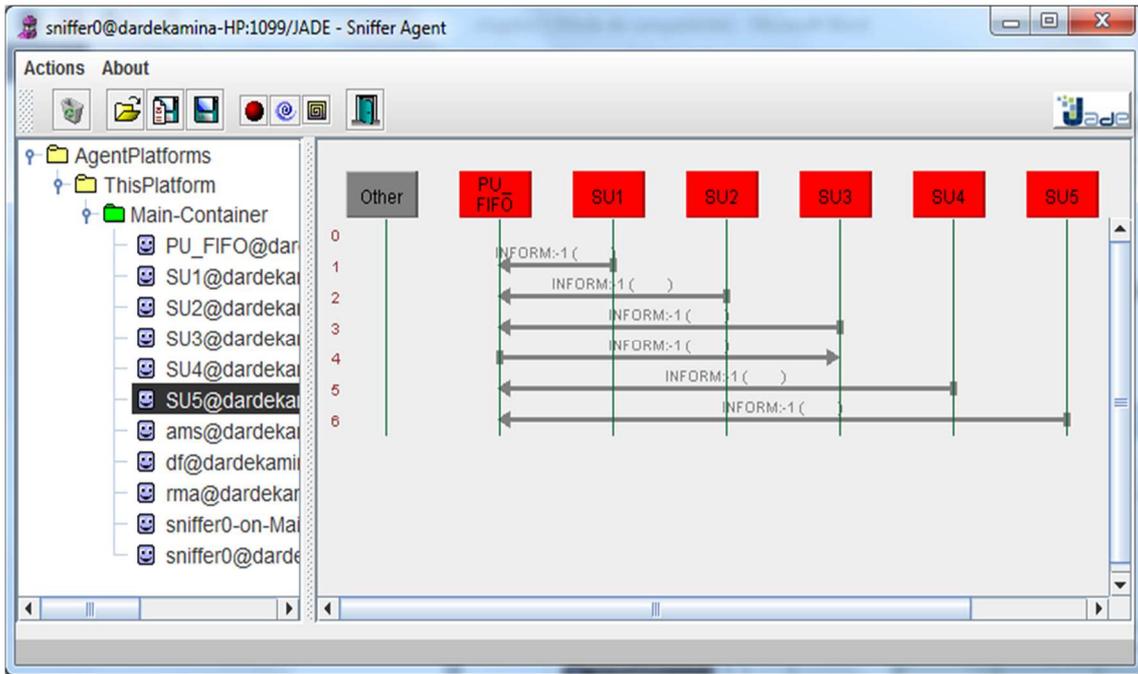


Figure 51: Agent Sniffer pour la technique FIFO'

### IV.3.4 Etude comparative

Nous avons implémenté les enchères en utilisant les algorithmes gloutons dans un premier temps et ensuite en utilisant la programmation dynamique. Nous avons ensuite comparé les résultats obtenus avec ceux de la méthode FIFO'.

#### a Comparaison en termes d'efficacité

Lorsqu'on parle d'efficacité, nous voulons dire le nombre de SU satisfaits. Pour cela, nous avons comparé les trois méthodes utilisées précédemment.

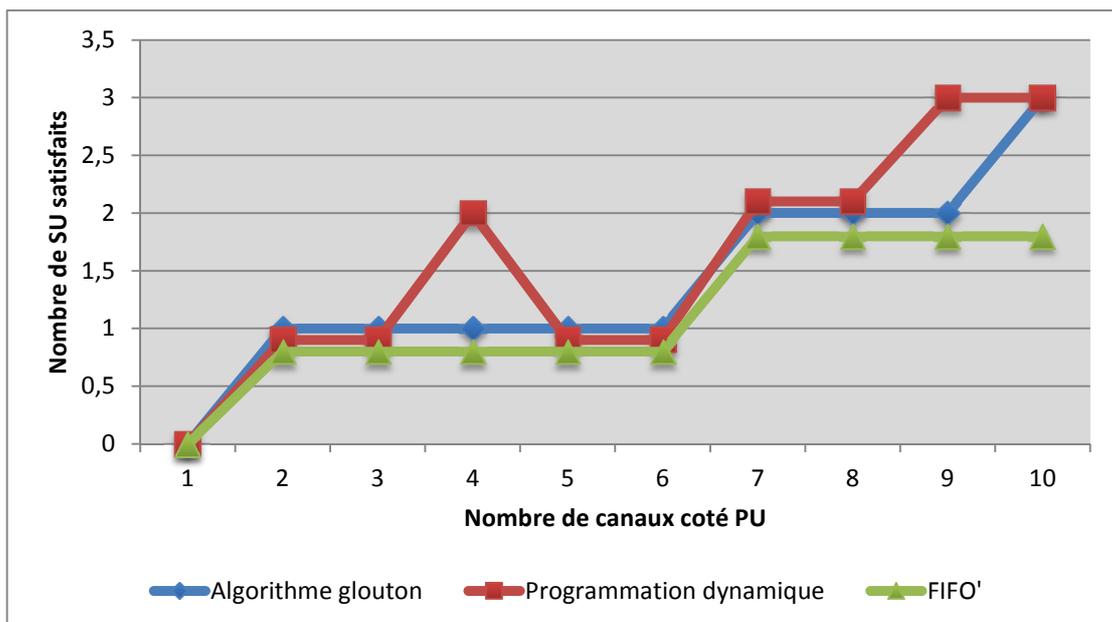


Figure 52: Impact des enchères sur le nombre de SU satisfaits.

D'après la figure 52, nous remarquons que le nombre de SU satisfaits avec l'enchère en utilisant la programmation dynamique est supérieur par rapport à celui obtenu avec FIFO' et l'enchère à enveloppe scellée.

### *b Comparaison en termes de gain de PU*

Dans cette section, nous allons montrer l'impact des enchères sur le gain obtenu par le PU. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 53.

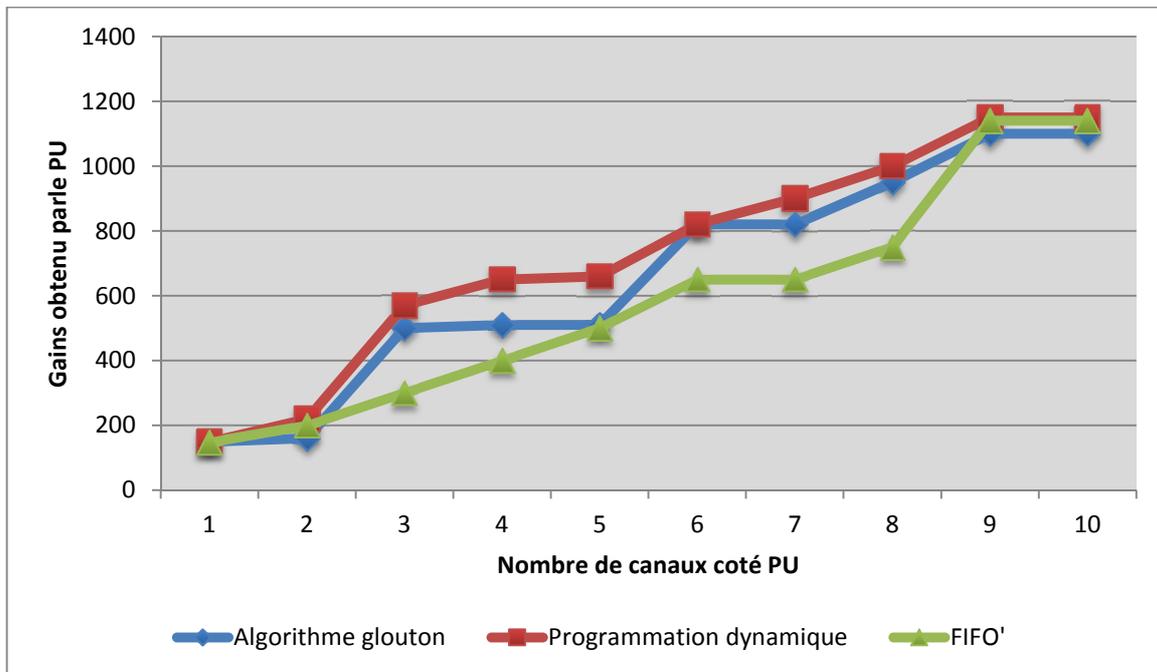


Figure 53: Impact des enchères sur le gain obtenu par le PU.

Nous remarquons que l'utilisation des enchères avec la programmation dynamique est plus bénéfique pour le PU car ses gains sont beaucoup plus importants par rapport à l'utilisation des enchères avec algorithme glouton ou l'utilisation de la technique FIFO'.

### *c Comparaison en termes de temps requis*

Pour connaître le temps de traitement (en milli seconde « ms ») pour qu'un nombre de SU puisse être satisfait, nous avons fait une comparaison entre l'utilisation des deux types d'enchères avec la méthode FIFO'.

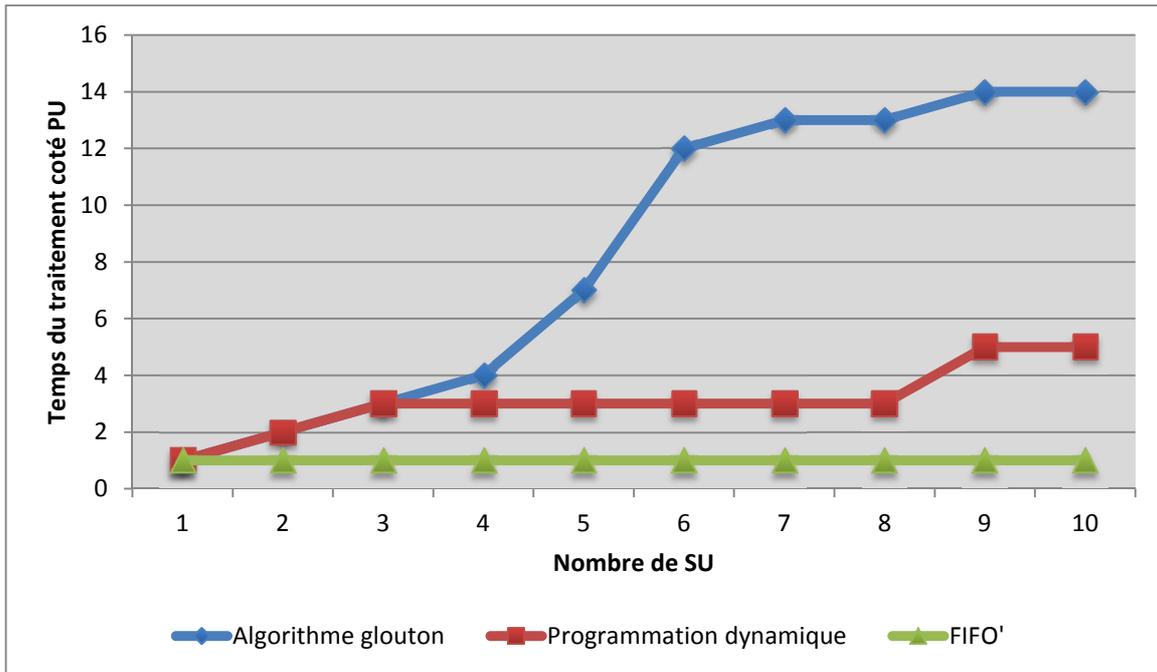


Figure 54: Temps du traitement coté PU par rapport au nombre de SU

Comme le montre la figure 54, avec les deux algorithmes (glouton, programmation dynamique), le temps de traitement côté PU augmente en fonction de l'augmentation du nombre de SU. C'est clair car avec plus de SU disponibles, le PU prend plus de temps pour choisir les meilleures offres proposées par ces SU. Mais l'utilisation des enchères avec programmation dynamique reste mieux que l'enchère avec algorithme glouton en termes de temps requis car cette dernière a besoin de beaucoup de temps pour trier les demandes reçues selon le prix unitaire de chaque SU.

*d Comparaison en termes de temps de réponse coté SU*

La figure 55 montre l'impact du taux d'arrivée des SU sur le temps de réponse toujours coté SU.

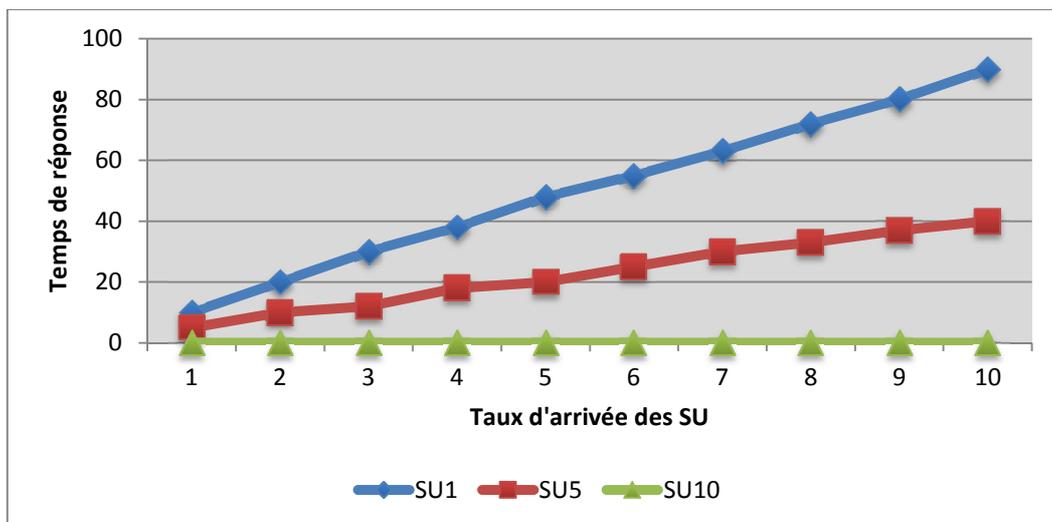


Figure 55: Temps de réponse par rapport aux taux d'arrivée des SU

Il faut remarquer ici que le temps de réponse coté SU correspond au temps attendu pour avoir une réponse de la part du PU, car pour les enchères il faut attendre jusqu'à l'arrivée du dernier SU et le lancement du PU. (Le coût du traitement en ms coté PU est toujours négligeable).

Le graphe de la figure 55 montre que le temps de réponse du SU augmente en fonction du taux d'arrivée des SU sauf dans le cas du dernier SU arrivé. En effet, celui-ci va faire une pause de 1 seconde (le temps nécessaire pour lancer le PU).

#### IV.4 Schéma n° 2 « plusieurs à un »: plusieurs PU à un SU

##### IV.4.1 Négociation basée sur la théorie des enchères

Dans ce scénario, nous supposons l'existence d'un seul SU et de plusieurs PU. Le SU a un besoin applicatif exprimé en termes de canaux et chaque PU possède un certain nombre de canaux libres, qu'il accepte de partager avec le SU.

La figure 56 montre le scénario traité dans ce schéma.

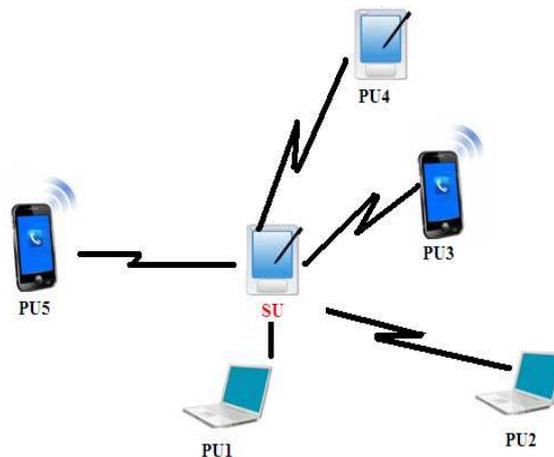


Figure 56: Schéma Un SU et plusieurs PU

Pour résoudre le problème d'encombrement du spectre, nous avons utilisé la négociation dans le cadre d'un système multi-agents. Pour cela, nous avons déployé un agent pour chaque PU et un agent par SU.

Nous avons fait de nombreux tests en gardant le même jeu de données mais en changeant le nombre de canaux demandés par le SU à chaque fois.

	Nombre de canaux libres	Prix unitaire
PU1	1	270
PU2	2	230
PU3	3	320
PU4	4	250
PU5	3	340

	Nombre de canaux demandés
Simulation 1	1
Simulation 2	3
Simulation 3	5

Tableau 9: Jeu de données

Pour la simulation1, tous les PU peuvent satisfaire le SU mais l'offre la plus intéressante est coté PU2 car il offre le prix le moins chère. La figure 57 montre le résultat de la simulation1:

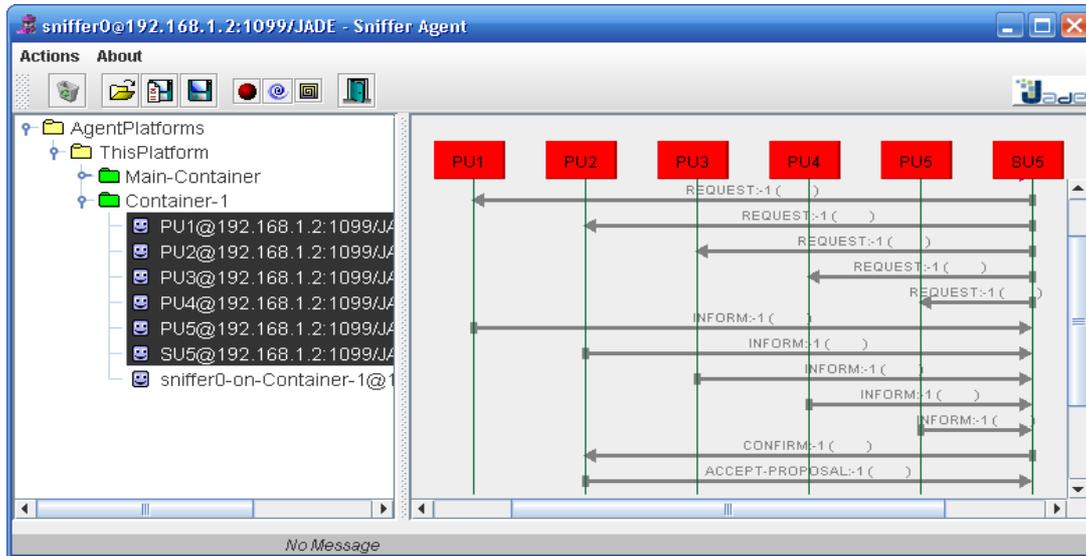


Figure 57: Sniffer avec 1 canal demandé coté SU

Pour la simulation2, PU1 et PU2 ne peuvent pas satisfaire le SU, l'offre la plus intéressante est coté PU4. La figure 58 montre les interactions entre les utilisateurs dans les simulations2 :

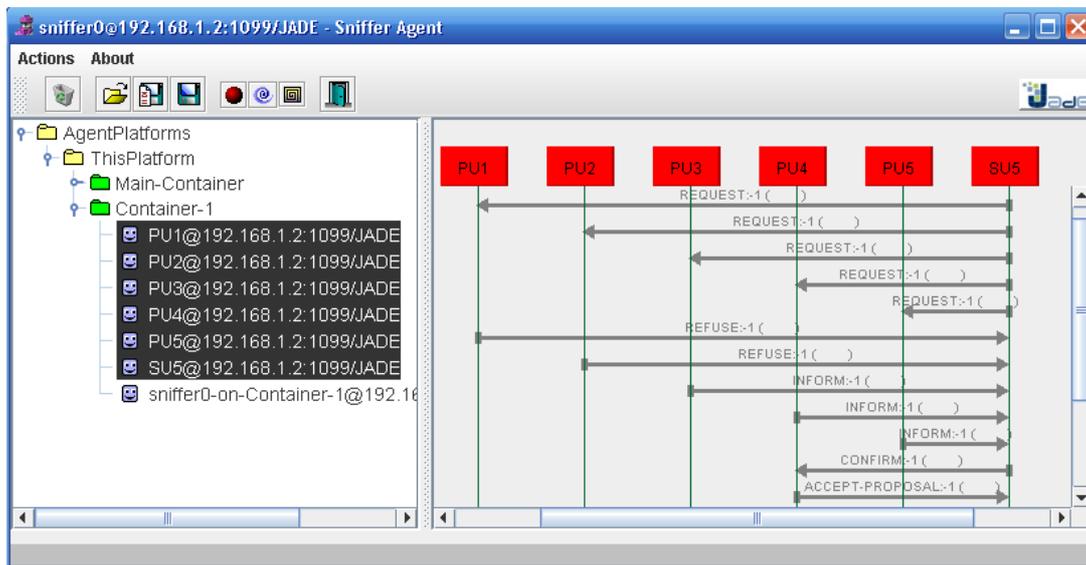


Figure 58: Sniffer avec 3 canaux demandés coté SU

Pour la troisième simulation, il n'y a aucun PU qui peut satisfaire le SU. La figure 59 montre les interactions entre les utilisateurs:

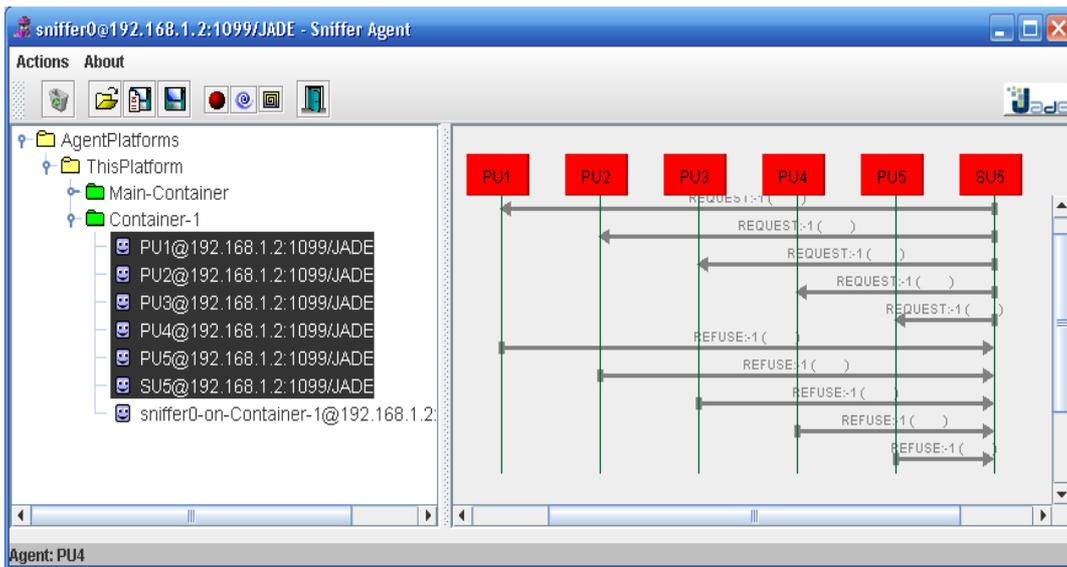


Figure 59: Sniffer avec 5 canaux demandés coté SU

Afin de voir l'impact du nombre de PU sur le temps de réponse coté SU, nous avons fixé le nombre de canaux coté SU à 3 et nous avons utilisé le même jeu de données précédent. Nous avons remarqué que le temps de négociation augmente pour le SU en négociant avec plus de PU ce qui est logique car le nombre de réponses à traiter augmente. La figure 60 montre le résultat obtenu.

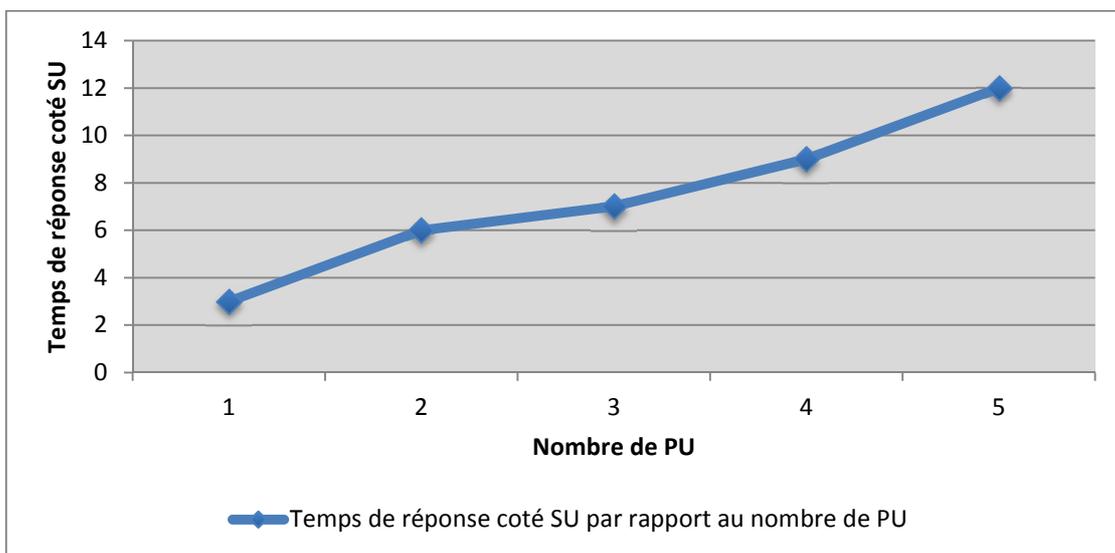


Figure 60: Impact du nombre de PU sur le temps de réponse coté SU

Nous avons ensuite évalué l'importance de la négociation par rapport au prix payé par le SU. La mise en œuvre de la négociation prend plus de temps dans le cas de plusieurs PU, mais elle est toujours intéressante pour le SU car elle lui permet de trouver l'offre la plus intéressante contrairement au cas où il ne fait pas de négociation.

- **Discussion**

Les résultats obtenus montrent que la négociation est importante pour le SU car elle lui permet de trouver la meilleure offre disponible malgré le temps qui reste en légère augmentation lorsque le nombre de PU augmente.

#### **IV.4.2 Négociation basée sur les méthodes multicritères**

Dans la plupart des travaux concernant la négociation du spectre, les chercheurs utilisent un seul critère qui est le prix. Il faut savoir également que les mécanismes d'enchères récents ne sont plus limités qu'au prix, mais sont caractérisés par d'autres critères tels que la qualité de l'objet, le montant ...,etc. C'est pour cela, qu'il y a des extensions sur les méthodes d'enchères comme les enchères multi-attributs. Ce domaine de recherche est prometteur et est à l'intersection entre la "théorie des enchères" et "l'analyse multicritères".

Notre proposition dans le contexte de ce travail est basée sur une négociation multicritères, car nous nous sommes concentrés sur plusieurs critères de négociation. Dans le scénario que nous allons traiter, nous proposons d'utiliser trois critères: le nombre de canaux, le prix et le temps d'allocation.

Nous avons opté pour l'algorithme TOPSIS décrit dans le chapitre II comme méthode multicritère pour les négociations entre utilisateurs dans le contexte de la radio cognitive.

L'implémentation de la méthode TOPSIS nécessite des poids pour chaque critère. Pour cela, nous avons utilisé les poids suivants  $w_j = \{0.25, 0.5, 0.25\}$  correspondant respectivement aux 3 critères {nombre de canaux, prix, temps d'allocation}.

Nous avons supposé que le prix a le poids le plus fort. Ainsi, dans la solution idéale, nous allons essayer de maximiser le nombre de canaux et le temps d'allocation et minimiser le prix. Par contre, dans la solution anti-idéale, nous allons restreindre le nombre de canaux et le temps d'allocation, et maximiser le prix.

Nous avons introduit également la notion de coalitions. En effet, nous avons utilisé une organisation à base de coalitions car cette méthode vise à créer une alliance entre les utilisateurs primaires ou secondaires en vue d'élire un utilisateur principal.

Nous avons intégré la notion de coalition du côté des PU seulement. A l'intérieur de chaque coalition, il y a des agents PU qui proposent des canaux libres à la vente, sur lesquels les agents SU peuvent enchérir. En effet, nous avons introduit des agents coalition CPU (Coalition Primary User) qui vont être cet intermédiaire entre les utilisateurs primaires et l'utilisateur secondaire.

Le CPU joue le rôle du coordinateur pour l'ensemble des PU présents dans sa zone géographique. L'objectif est d'aboutir à une meilleure complexité en nombre de messages échangés, également à un gain de temps important de réponse côté SU.

La figure 61 nous décrit les interactions entre les agents CPU et le SU pendant la négociation.

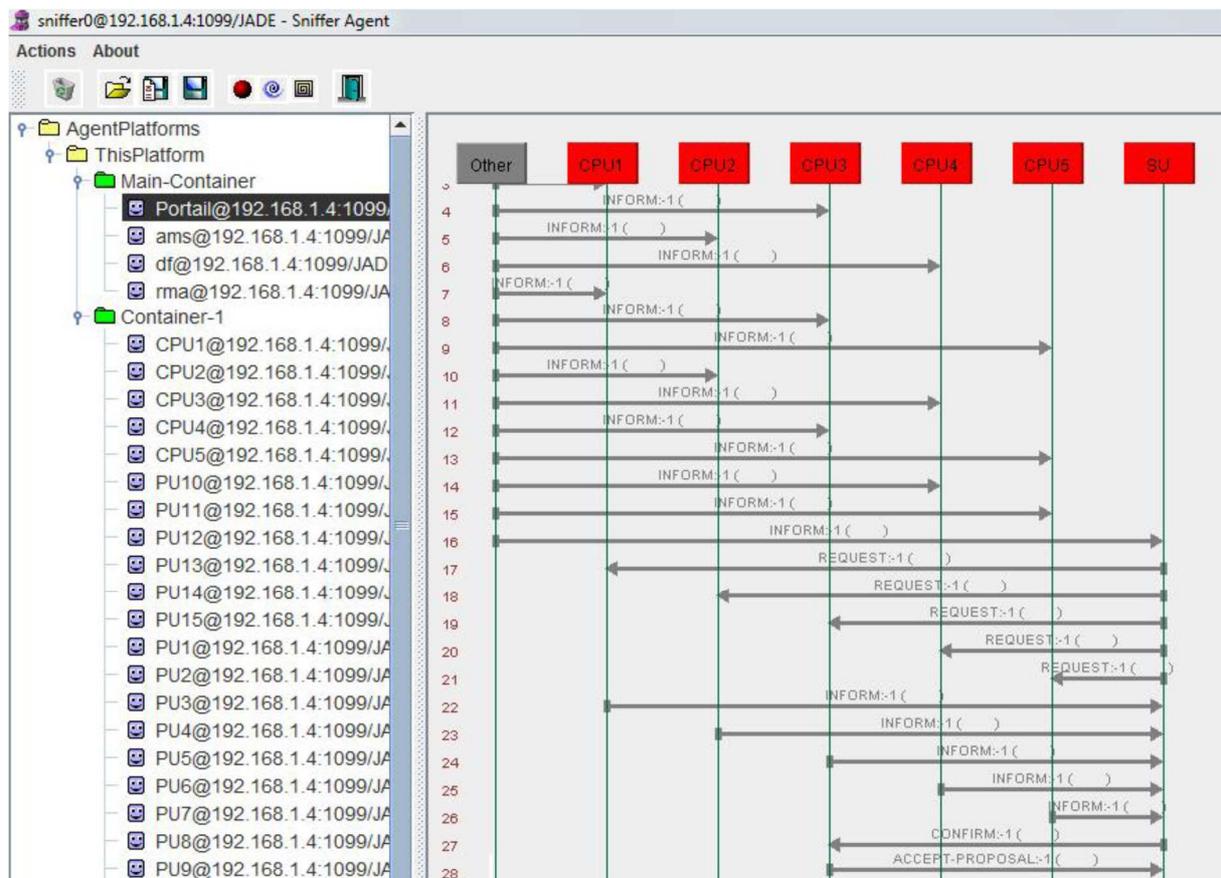


Figure 61: Agent Sniffer pour la méthode TOPSIS

- [1..15] : chaque PU envoie au CPU le plus proche un message INFORM pour l'informer qu'il est dans sa zone et pour qu'il soit chargé dans ce CPU.
- [16] : le SU reçoit la valeur saisie dans le champ nombre de canaux demandés.
- [17..21] : le SU envoie au CPU des messages de type REQUEST dans le but de préciser le nombre de canaux voulus.
- [22..26] : chaque CPU, après avoir traité la requête du SU, renvoie un message de type INFORM pour prévenir le SU du PU qui détient l'offre la mieux adaptée à sa demande.
- [27] : après le traitement des réponses reçues de la part des CPU, le SU envoie une confirmation au CPU qui contient l'offre choisie.
- [28] : le CPU concerné envoie au SU le « ACCEPT-PROPOSAL ».

#### IV.4.3 Etude comparative

Dans cette section, nous allons élaborer une comparaison entre les résultats obtenus avec l'implémentation des agents coalitions CPU, et ceux obtenus sans l'implémentation des coalitions. Une autre comparaison a été réalisée en termes de temps de réponse coté SU, entre l'utilisation de la méthode multicritères « TOPSIS » et l'utilisation de la méthode à un seul critère « minimisation des prix ». Nous allons aussi étudier l'impact du passage à l'échelle dans le cadre de l'utilisation de CPU.

- **Comparaison en termes de temps de réponse coté SU**

La nécessité de recevoir une réponse rapide à sa demande en la présence de plusieurs offres pousse le SU à considérer le temps de réponse comme étant un paramètre important.

Le tableau 10 indique les résultats obtenus par les deux implémentations (avec et sans coalitions).

Nombre de PU	Avec coalitions	Sans coalitions
6	3	10
9	5	15
12	10	17
15	11	18
100	18	40

Tableau 10: Temps de réponse coté SU(ms) par rapport au nombre de PU

L'histogramme suivant montre le résultat obtenu.

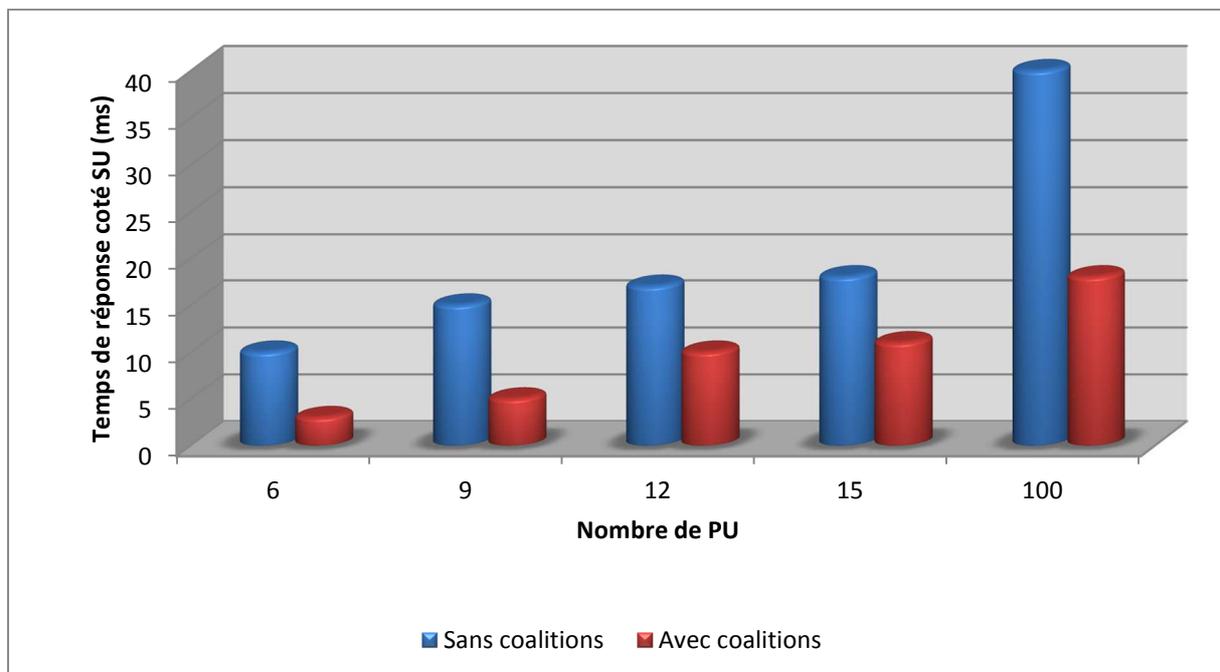


Figure 62: Impact de l'implémentation des coalitions sur le temps de réponse coté SU

La figure 63 nous montre l'impact de l'utilisation des coalitions, ces dernières nous permettent un gain estimable en termes de temps de réponse. Au début, la différence n'est pas aussi remarquable, mais lors du passage à l'échelle, nous décelons très bien la différence estimable dans le temps. Nous remarquons aussi le temps de négociation qui s'accroît lorsque le nombre de CPU augmente, fait logique vu que le nombre de réponses à traiter coté SU augmente dans ce cas.

La figure 64 illustre un histogramme de comparaison en termes de temps de réponse entre la méthode multicritères TOPSIS et la méthode monocritère que consiste à minimiser les prix.

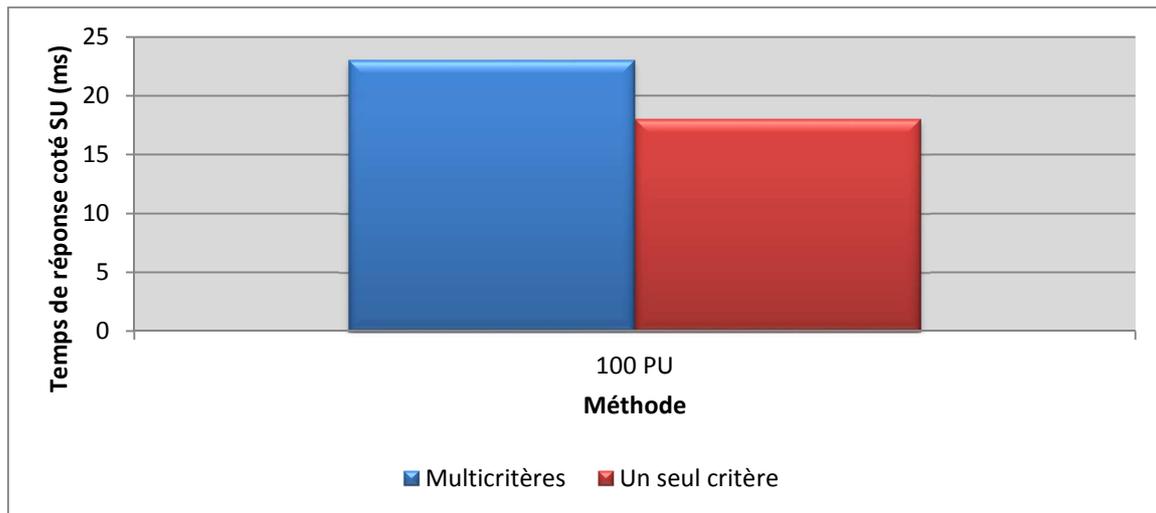


Figure 63: multicritères VS monocritère

En réalité, la différence entre les deux méthodes en termes de temps de réponse n'est pas flagrante. Nous apercevons que la méthode multicritères TOPSIS prend un peu plus de temps puisqu'elle réalise trop de calculs afin de trouver une solution optimale suivant le poids affecté à chaque critère.

- **Comparaison en termes de nombre de messages échangés**

L'utilisation des coalitions va nous permettre de diminuer le trafic des messages échangés entre les agents car chaque CPU regroupe plusieurs PU. Par conséquent, la négociation se fait directement entre les CPU et le SU.

Le tableau 11 nous montre le nombre de messages échangés avec et sans l'utilisation des coalitions.

Nombre de PU	Avec coalitions	Sans coalitions
6	6	14
9	8	20
12	10	26
15	12	32
100	22	202

Tableau 11: Nombre de messages échangés entre le SU et les CPU pendant la négociation

Cette étude nous a mené à établir l'histogramme suivant.

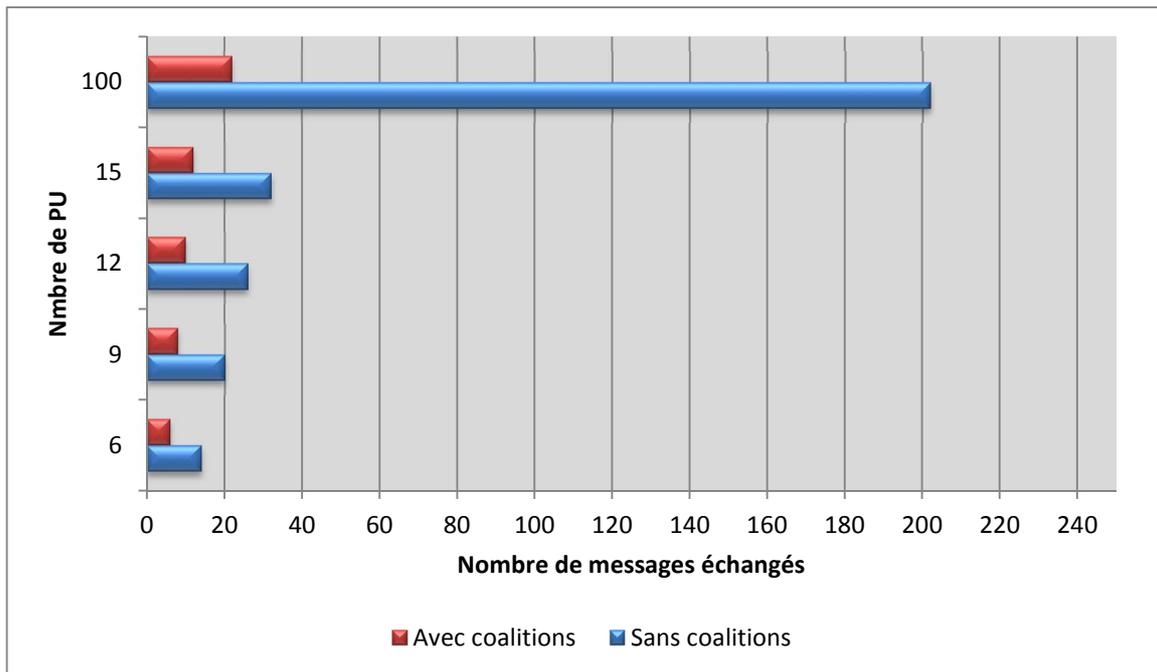


Figure 64: Complexité en nombre de messages

Nous distinguons qu'à chaque fois le nombre de CPU augmente, le nombre de messages augmente à son tour puisque les interactions s'amplifient. En ce qui concerne la comparaison dans les deux cas (avec/sans) coalitions, l'absence des coalitions pousse le SU à interroger les PU un par un. Cependant, l'implémentation des CPU réduit le nombre de messages car chaque CPU regroupe plusieurs PU et de ce fait le SU interroge un nombre restreints d'agents, d'où la diminution du nombre de messages.

L'histogramme démontre l'énorme différence en termes de nombre de messages échangés entre les deux implémentations (avec et sans coalitions), lors du passage à l'échelle, la non-utilisation des coalitions pourra donc provoquer des saturations au sein du réseau.

- **Discussion**

Les résultats obtenus démontrent que l'implémentation des CPU permet un gain estimable dans le temps de réponse coté SU, ce dernier n'aura pas à réaliser des négociations avec tous les PU présents mais plutôt avec quelques CPU qui regroupent plusieurs PU et font l'effort de n'envoyer qu'une seule offre adaptée au besoin du SU. Ainsi, le SU traite un nombre réduit de réponses, ce qui décroît automatiquement le temps de réponse.

L'utilisation des CPU va nous mener à une meilleure complexité en nombre de messages puisque le nombre de messages échangés sera diminué par rapport à une négociation qui ne nécessite pas l'utilisation des coalitions. Par ailleurs, l'implémentation de la méthode TOPSIS fut établie pour une offre spécifique selon le critère que nous voudrions lui affecter le poids le plus fort.

### IV.5 Schéma n° 3 « plusieurs à plusieurs »: plusieurs PU à plusieurs SU

Dans ce schéma, nous étudions le cas fréquent, c'est à dire plusieurs SU qui négocient avec plusieurs PU et il faut dire que c'est le cas que nous risquons de rencontrer le plus souvent lors de l'utilisation de la RC.

Nous avons également intégré la notion de coalition, mais cette fois ci pas seulement du coté des PU mais aussi du coté des SU. En réalité, nous avons introduit des agents coalition CPU et CSU (Coalition Secondary User) qui vont être cet intermédiaire entre les utilisateurs primaires et les utilisateurs secondaires. Dans ce cas, il y aura certainement beaucoup plus de messages échangés par rapport au cas précédent (CPU seulement) car on ajoute l'interaction entre les CSU et les SU. Alors pour palier à ce problème et réduire le nombre de messages, nous proposons d'agréger les demandes des SU en un seul message qui sera envoyé au CPU.

Nous avons décidé de continuer avec l'utilisation de la négociation multicritères car elle a donné de bons résultats dans le schéma précédent. Nous rappelons que les critères utilisés sont le nombre de canaux, le prix et le temps d'allocation.

Comme pour le schéma précédent, nous avons utilisé le même algorithme multicritère (TOPSIS) avec les mêmes poids  $w_j = \{0.25, 0.5, 0.25\}$  correspondant respectivement aux 3 critères {nombre de canaux, prix, temps d'allocation} mais cette fois ci au niveau des CPU et CSU afin d'obtenir la meilleure offre.

#### IV.5.1 Etude comparative

Dans cette partie, nous allons élaborer une comparaison entre les résultats obtenus avec l'implémentation des CPU et CSU, ceux obtenus avec l'implémentation des CPU seulement et sans l'implémentation des coalitions.

L'utilisation des coalitions va nous permettre de diminuer le trafic des messages échangés entre les agents car chaque CPU regroupe plusieurs PU et chaque CSU regroupe plusieurs SU. Par conséquent, la négociation se fait directement entre les CPU et les CSU.

Les résultats ci-dessous ont été étudiés dans un scénario où il y a 5 CPU et 5 CSU avec un nombre fixe de 3PU par CPU et un nombre de SU qui change.

Le tableau 12 nous montre le nombre de messages échangés dans les 3 cas par rapport au nombre de SU dans chaque CSU.

SU	CPU et CSU	CPU seulement	Sans coalitions
5	65	140	375
10	90	265	750
15	115	390	1125
25	165	640	1875
50	290	1265	3750
75	415	1890	5625
100	540	2515	7500

Tableau 12: Nombre de messages échangés par rapport au nombre de SU dans chaque CSU

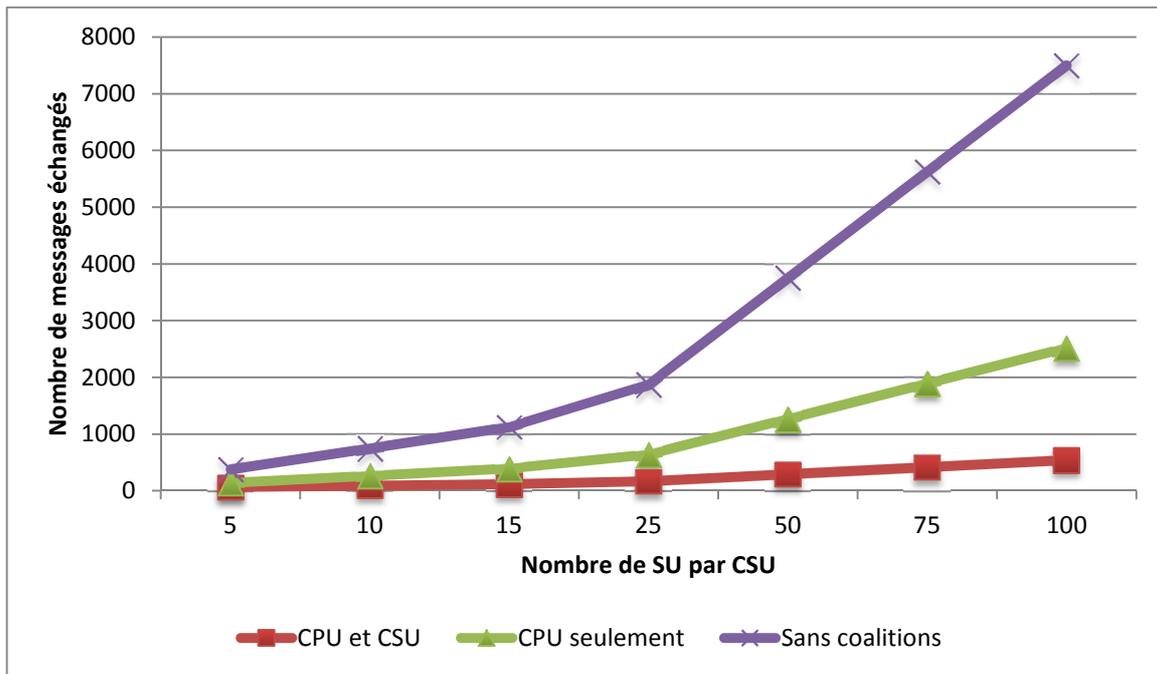


Figure 65: Complexité en nombre de messages dans les 3 cas

Nous distinguons qu'à chaque fois le nombre de SU augmente, le nombre de messages augmente à son tour puisque les interactions s'amplifient.

Le graphe montre l'énorme différence en termes de nombre de messages échangés entre les trois implémentations, lors du passage à l'échelle, la non-utilisation des coalitions pourra donc provoquer des saturations au sein du réseau.

La figure 65 montre que l'implémentation des coalitions des deux cotés PU et SU combinée à la méthode d'agrégation de messages donne un gain remarquable au niveau du nombre de messages échangés car d'un côté les CPU et CSU regroupent les agents et évitent que chaque utilisateur interroge les autres un par un, et de l'autre côté l'agrégation permet de fusionner plusieurs messages en un seul.

L'utilisation de TOPSIS des deux cotés CPU et CSU permet d'obtenir le meilleur résultat possible en terme de canaux.

Ceci dit, le temps de réponse dans le cas de l'utilisation des CPU et CSU est plus grand que le cas de l'utilisation des CPU seulement. Ceci est logique car le temps de réponse augmente avec l'augmentation du nombre de SU.

## IV.6 Conclusion

Nous avons pu présenter dans ce chapitre les différentes approches qu'on a pu étudier. Nous avons proposé en premier lieu une approche basée sur la théorie des enchères en utilisant plusieurs méthodes et algorithmes différents, ensuite nous avons proposé une autre approche basée sur la décision multicritère où nous avons introduit des critères autre que le prix.

Dans le cadre de la RC, la négociation est une des solutions les plus simples pour faire face à l'encombrement causé par le manque de ressources disponibles pour les SU.

Notre première approche a prouvé qu'il est préférable d'utiliser des enchères à un seul tour surtout si on cherche à satisfaire des applications qui nécessitent une réponse immédiate, car l'utilisation des enchères à plusieurs tours peut nous faire perdre quelques secondes vu que la procédure est un peu plus longue et plus lente.

Nous avons prouvé aussi que pour résoudre le problème de l'encombrement du spectre, il vaut mieux utiliser une des techniques d'accès dynamique au spectre au lieu de ne rien utiliser et satisfaire la première demande reçue.

D'après les résultats obtenus, il s'avère être préférable d'utiliser les enchères avec la programmation dynamique pour résoudre le problème de l'encombrement du spectre et pour une gestion plus efficace de celui-ci car tous les utilisateurs sont gagnants. Les SU gagnent en satisfaisant leurs besoins et le PU gagne en termes de gains.

Nous avons introduit des agents coalitions CPU et CSU dans les négociations entre les agents PU et SU pour le partage de spectre dans le cadre de réseaux de radio cognitive. Ceci a été fait à l'aide des systèmes multi-agents, en utilisant une méthode d'aide à la prise de décision (TOPSIS) pour une solution optimale suivant un système de poids affecté à chaque critère. Il s'avère que l'utilisation des coalitions pourrait être vue comme une solution favorable pour le passage à l'échelle.

## **Conclusion générale**

La RC offre aux utilisateurs un débit supérieur, une meilleure QoS et une augmentation du confort dans les communications. Afin de pouvoir tirer le maximum de profit de la bande passante globale disponible, une gestion optimisée du spectre s'impose. Pour cela, nous avons utilisé différents algorithmes issus du domaine multi-agents.

La fusion entre les SMA et la RC est un domaine alliant l'IAD aux télécommunications. En effet, les SMA empruntent à l'IAD les modes de communication entre agents, l'autonomie et l'émergence.

Le travail présenté dans cette thèse est consacré à l'optimisation de la gestion du spectre dans les réseaux de RC. Cependant, l'intérêt de l'utilisation des techniques d'accès dynamique au spectre pour l'optimisation des performances de la RC a déjà fait ses preuves.

L'étude a montré que l'utilisation des SMA est une technique judicieuse pour l'attribution des ressources et le partage du spectre. Par ailleurs, l'interaction et la communication entre les agents permettent une meilleure organisation et une meilleure adaptabilité.

L'architecture multi-agents proposée dans cette thèse traite les aspects les plus importants de la RC, d'ailleurs, elle est composée de trois niveaux différents: physique, cognitif et comportemental. Ce dernier est le plus important dans notre étude car c'est l'étape qui consiste à étudier l'interaction entre les agents et le comportement de chacun d'eux dans les différents scénarios qu'il peut rencontrer.

Le choix du protocole de communication entre les agents est très important. Dans notre cas, nous avons opté pour une négociation entre les utilisateurs. Pour cela, nous avons utilisé plusieurs protocoles basés sur la théorie des enchères et sur la décision multicritères.

Il est clair qu'il est préférable d'utiliser des protocoles à base de décision multicritères car l'étude sera plus générale et ne sera pas basée sur un seul critère comme c'est le cas avec la théorie des enchères. En effet, les résultats ont montré que l'utilisation des algorithmes de décision multicritères permet aux utilisateurs de choisir la meilleure offre selon leurs besoins.

Ceci dit, dans le cas où le seul souci de l'utilisateur est le prix, il est plus intéressant d'utiliser la théorie des enchères et plus particulièrement les enchères à un seul tour avec programmation dynamique car tous les utilisateurs y gagnent (le SU assure sa QoS et le PU assure un gain maximum).

L'intégration des agents de coalitions est une idée qui s'est avérée très efficace, les résultats obtenus ont montré que l'utilisation des coalitions réduit le temps de réponse ainsi que le nombre de messages échangés entre les utilisateurs au sein du SMA.

Naturellement, d'autres nombreuses études restent à mener pour compléter ces travaux. L'utilisation des clusters au lieu des coalitions proposées dans cette thèse pourrait apporter un plus à nos travaux. Ceci, pourra aider à la mobilité des utilisateurs qui vont se déplacer d'un endroit à un autre en changeant de cluster à chaque fois.

Il serait intéressant de penser à utiliser les algorithmes d'optimisation pour améliorer la gestion du spectre. Nous aimerions également optimiser les fonctions de détection du spectre afin de réduire les interférences entre les utilisateurs.

Nous pensons qu'il est judicieux d'intégrer des méthodes d'authentification pour les utilisateurs afin de sécuriser l'accès dynamique au spectre.

## Références bibliographiques

- [1] Fabrice Lemainque, Jean-François Pillou. Tout sur les réseaux sans fil. Edition Dunod. 2009.
- [2] Badis Hakim. Etude et conception d'algorithmes pour les réseaux mobiles et ad-hoc. Networking and Internet Architecture. Université Paris Sud - Paris XI, 2005.
- [3] Hossain, Ekram, et al. "Evolution toward 5G multi-tier cellular wireless networks: An interference management perspective." *Wireless Communications, IEEE* 21.3 (2014): 118-127.
- [4] Hossain, Ekram, Dusit Niyato, and Zhu Han. *Dynamic spectrum access and management in cognitive radio networks*. Cambridge University Press, 2009.
- [5] Fette, Bruce A., ed. *Cognitive radio technology*. Academic Press, 2009.
- [6] Mueck, Markus, et al. ETSI reconfigurable radio systems: status and future directions on software defined radio and cognitive radio standards. *Communications Magazine, IEEE* 48.9 (2010): 78-86.
- [7] Metref, Adel. Contribution à l'étude du problème de synchronisation de porteuse dans le contexte de la Radio Intelligente. Diss. Université Rennes 1, 2010.
- [8] Mitola, Joseph, and Gerald Q. Maguire Jr. Cognitive radio: making software radios more personal. *Personal Communications, IEEE* 6.4 (1999): 13-18.
- [9] Clancy, Charles, et al. Applications of machine learning to cognitive radio networks. *Wireless Communications, IEEE* 14.4 (2007): 47-52.
- [10] He, An, et al. "A survey of artificial intelligence for cognitive radios." *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 59.4 (2010): 1578-1592.
- [11] Akyildiz, Ian F., Won-Yeol Lee, and Kaushik R. Chowdhury. CRAHNS: Cognitive radio ad hoc networks. *Ad Hoc Networks* 7.5 (2009): 810-836.
- [12] Haykin, Simon. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* 23.2 (2005): 201-220.
- [13] Li, Shujun, and Miécyslaw Kokar. *Flexible Adaptation in Cognitive Radios*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [14] Preston Marshall, *Cognitive Radio Technology*. Elsevier, 2009.
- [15] Xu, Ding, et al. An Architecture for Cognitive Radio Networks with Cognition, Self-organization and Reconfiguration Capabilities. *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE*. IEEE, 2012.

- [16] Qin, Tao, et al. Towards a trust aware cognitive radio architecture. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* 13.2 (2009): 86-95.
- [17] Wang, Shixian, et al. Acra: An autonomic and expandable architecture for cognitive radio nodes. *Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2010 International Conference on. IEEE, 2010.*
- [18] Siddavatm, Irfan. Mapping of cognitive radio as intelligent agent architecture. *Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology (Wireless VITAE), 2011 2nd International Conference on. IEEE, 2011.*
- [19] Tachwali, Yahia, Fadi Basma, and Hazem H. Refai. Cognitive radio architecture for rapidly deployable heterogeneous wireless networks. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 56.3 (2010): 1426-1432.
- [20] Hossain, Ekram, Dusit Niyato, and Zhu Han. *Dynamic spectrum access and management in cognitive radio networks.* Cambridge University Press, 2009.
- [21] Mitola, Joseph. *Cognitive Radio---An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio.* (2000).
- [22] Ngom, Insa, and Louis Diouf. *La radio cognitive.* *Master Professionnel Télécommunications* 2008.3 (2007).
- [23] Katidiotis, Apostolos, Kostas Tsagkaris, and Panagiotis Demestichas. Performance evaluation of artificial neural network-based learning schemes for cognitive radio systems. *Computers & Electrical Engineering* 36.3 (2010): 518-535.
- [24] Rondeau, Thomas W., et al. Cognitive radios with genetic algorithms: Intelligent control of software defined radios. *Software defined radio forum technical conference.* 2004.
- [25] Newman, Timothy R., et al. Population adaptation for genetic algorithm-based cognitive radios. *Mobile networks and applications* 13.5 (2008): 442-451.
- [26] Rieser, Christian James. *Biologically inspired cognitive radio engine model utilizing distributed genetic algorithms for secure and robust wireless communications and networking.* Diss. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
- [27] Li, Jiandong, and Chungang Yang. A Markovian game-theoretical power control approach in cognitive radio networks: A multi-agent learning perspective. *Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2010 International Conference on. IEEE, 2010.*
- [28] Galindo-Serrano, Ana, and Lorenza Giupponi. Aggregated interference control for cognitive radio networks based on multi-agent learning. *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2009. CROWNCOM'09. 4th International Conference on. IEEE, 2009.*

- [29] Kasbekar, Gaurav S., and Saswati Sarkar. Spectrum auction framework for access allocation in cognitive radio networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)* 18.6 (2010): 1841-1854.
- [30] Khan, Shafiullah, and Kok-Keong Loo. Real-time cross-layer design for a large-scale flood detection and attack trace-back mechanism in IEEE 802.11 wireless mesh networks. *Network Security* 2009.5 (2009): 9-16.
- [31] Xin, Chunsheng, et al. On random dynamic spectrum access for cognitive radio networks. *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, 2010 IEEE. IEEE, 2010.
- [32] Zhang, Jin, and Qian Zhang. Stackelberg game for utility-based cooperative cognitive radio networks. *Proceedings of the tenth ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. ACM, 2009.
- [33] Akbar, Ihsan A., and William H. Tranter. Dynamic spectrum allocation in cognitive radio using hidden Markov models: Poisson distributed case. *SoutheastCon, 2007. Proceedings*. IEEE. IEEE, 2007.
- [34] Rashid, Mohammad M., et al. Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks: A queueing analytic model and admission controller design. *Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM'07*. IEEE. IEEE, 2007.
- [35] Nguyeny, Thao, Brian L. Mark, and Yariv Ephraim. Hidden Markov process based dynamic spectrum access for cognitive radio. *Information Sciences and Systems (CISS), 2011 45th Annual Conference on*. IEEE, 2011.
- [36] Demazeau, Yves. From interactions to collective behaviour in agent-based systems. In: *Proceedings of the 1st. European Conference on Cognitive Science*. Saint-Malo. 1995.
- [37] Jennings, Nicholas R. *Agent-oriented software engineering. Multiple Approaches to Intelligent Systems*. Springer Berlin Heidelberg, 1999. 4-10.
- [38] Ferber, Jacques, and Jean-François Perrot. *Les systèmes multi-agents: vers une intelligence collective*. InterEditions, 1995.
- [39] Wooldridge, Michael, and Nicholas R. Jennings. *Intelligent agents: Theory and practice*. *The knowledge engineering review* 10.02 (1995): 115-152.
- [40] Brustoloni, Jose C. *Autonomous agents: Characterization and requirements*. Carnegie-Mellon University. Department of Computer Science, 1991.
- [41] Chaib-Draa, Brahim, Imed Jarras, and Bernard Moulin. *Systèmes multi-agents: principes généraux et applications. Principes et architectures des systèmes multi-agents* (2001).
- [42] Moraitis, Pavlos. *Paradigme multi-agent et prise de décision distribuée*. Diss. 1994.

- [43] N. Dailly, “Systemes Multiagents,” 2003. Disponible: <http://www.dailly.info/-090-Systemes-Multiagents-.> [consulté: 15-Feb-2015].
- [44] Müller, Jean-Pierre. Des systèmes autonomes aux systèmes multi-agents: Interaction, émergence et systèmes complexes. Mémoire d’habilitation à diriger des recherches, Université de Montpellier II (2002).
- [45] M. Yattara, “Interaction coopération et communication dans les systèmes multi agent,” 2011. Disponible: [http://www.kalanko.org/affichage\\_chapitre.php?id\\_chapitre=4](http://www.kalanko.org/affichage_chapitre.php?id_chapitre=4). [consulté le: 18-Feb-2015].
- [46] Russel, Stuart, and Peter Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach, 2003. EUA: Prentice Hall.
- [47] Chen, Bo, and Samira Sadaoui. A Generic Formal Framework for Multiagent Interaction Protocols. Regina: Department of Computer Science, University of Regina, 2003.
- [48] Finin, Tim, et al. KQML as an agent communication language. Proceedings of the third international conference on Information and knowledge management. ACM, 1994.
- [49] Horling, Bryan, and Victor Lesser. A survey of multi-agent organizational paradigms. The Knowledge Engineering Review 19.04 (2004): 281-316.
- [50] Sandholm, Tuomas W. Negotiation among self-interested computationally limited agents. Diss. University of Massachusetts Amherst, 1996.
- [51] Smith, R. The contract net protocol: Highlevel communication and control in a distributed problem solver, 1980. IEEE Trans. on Computers, C 29: 12.
- [52] Mir, Usama, Leila Merghem-Boulahia, and Dominique Gaïti. A cooperative multiagent based spectrum sharing. Telecommunications (AICT), 2010 Sixth Advanced International Conference on. IEEE, 2010.
- [53] Florea, Adina Magda. Using Utility Values in Argument-based Negotiation. IC-AI. Vol. 2. 2002.
- [54] Neel, James, et al. Using game theory to analyze physical layer cognitive radio algorithms. Bradley Department of Electrical Engineering, Virginia Tech(2005).
- [55] Dzikowski, Jacek, and Cynthia Hood. An agent-based simulation framework for cognitive radio studies. Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2009.
- [56] Xing, Yiping, et al. Dynamic spectrum access in open spectrum wireless networks. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on 24.3 (2006): 626-637.

- [57] Zhang, Jin, and Qian Zhang. Stackelberg game for utility-based cooperative cognitive radio networks. Proceedings of the tenth ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing. ACM, 2009.
- [58] Mir, Usama. Utilization of Cooperative Multiagent Systems for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks. PHD theses, Sep 17 (2011).
- [59] Trigui, Emna, Moez Esseghir, and Leila Merghem Boulahia. Gestion dynamique du spectre entre terminaux radio cognitive mobiles. CFIP 2011-Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles. 2011.
- [60] Raiyn, Jamal. Toward cognitive radio handover management based on social agent technology for spectrum efficiency performance improvement of cellular systems. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on. IEEE, 2008.
- [61] Qian, Liang, et al. Spectrum trading in cognitive radio networks: an agent-based model under demand uncertainty. Communications, IEEE Transactions on 59.11 (2011): 3192-3203.
- [62] Fudenberg, Drew, and Jean Tirole. Game theory. 1991. Cambridge, Massachusetts 393 (1991).
- [63] Raoof, Omar, and Hamed Al-Raweshidy. Theory of Games: An Introduction. SCIYO. COM 1 (2010).
- [64] Letaief, Khaled, and Wei Zhang. Cooperative communications for cognitive radio networks. Proceedings of the IEEE 97.5 (2009): 878-893.
- [65] Niyato, Dusit, and Ekram Hossain. Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks: a dynamic game approach. Wireless Communications, IEEE Transactions on 7.7 (2008): 2651-2660.
- [66] Saad, Walid, et al. Coalitional games in partition form for joint spectrum sensing and access in cognitive radio networks. Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of 6.2 (2012): 195-209.
- [67] Chang, Hung-Bin, and Kwang-Cheng Chen. Auction-based spectrum management of cognitive radio networks. Vehicular Technology, IEEE Transactions on 59.4 (2010): 1923-1935.
- [68] Han, Zhu, Rong Zheng, and Harold Vincent Poor. Repeated auctions with Bayesian nonparametric learning for spectrum access in cognitive radio networks. Wireless Communications, IEEE Transactions on 10.3 (2011): 890-900.
- [69] Ji, Zhu, and KJ Ray Liu. Belief-assisted pricing for dynamic spectrum allocation in wireless networks with selfish users. Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2006. SECON'06. 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on. Vol. 1. IEEE, 2006.

- [70] Chen, Bin, et al. Optimizing the second-price auction algorithm in a Dynamic Cognitive Radio Network. *Communication Systems*, 2008. ICCS 2008. 11th IEEE Singapore International Conference on. IEEE, 2008.
- [71] Wu, Guangen, Pinyi Ren, and Chao Zhang. A waiting-time auction based dynamic spectrum allocation algorithm in cognitive radio networks. *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, 2011 IEEE. IEEE, 2011.
- [72] Chen, Lin, et al. An auction framework for spectrum allocation with interference constraint in cognitive radio networks. *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*. IEEE, 2010.
- [73] Jia, Juncheng, et al. Revenue generation for truthful spectrum auction in dynamic spectrum access. *Proceedings of the tenth ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. ACM, 2009.
- [74] Amraoui, Asma, et al. Auction-based Agent Negotiation in Cognitive Radio Ad Hoc Networks. *Ad Hoc Networks*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 119-134.
- [75] Wu, Yongle, et al. Collusion-resistant multi-winner spectrum auction for cognitive radio networks. *Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008*. IEEE. IEEE, 2008.
- [76] K. Hwang, Ching-Lai, Yoon, *Multiple Attribute Decision Making - Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*. 1981.
- [77] Hwang, Ching-Lai, Young-Jou Lai, and Ting-Yun Liu. A new approach for multiple objective decision making. *Computers & operations research* 20.8 (1993): 889-899.
- [78] JFigueira, José, Salvatore Greco, and Matthias Ehrgott, eds. *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. Vol. 78. Springer Science & Business Media, 2005.
- [79] Lahby, Mohamed, Leghris Cherkaoui, and Abdellah Adib. An enhanced-TOPSIS based network selection technique for next generation wireless networks. *Telecommunications (ICT), 2013 20th International Conference on*. IEEE, 2013.
- [80] H. W. Networks, “Heterogeneous Wireless Networks ( Jiangsu key laboratory of wireless communications , Nanjing University of Posts and Telecommunications , Nanjing , 21 0003 ),” pp. 750–754, 2010.
- [81] Isaksson, Lennart, and Markus Fiedler. Seamless connectivity in WLAN and cellular networks with multi criteria decision making. *Next Generation Internet Networks, 3rd EuroNGI Conference on*. IEEE, 2007.
- [82] Ahmed, Atiq, et al. An Agent Based Architecture for Cognitive Spectrum Management. *Australian Journal of Basic & Applied Sciences* 5.12 (2011).
- [83] Mir, Usama, Leila Merghem-Boulahia, and Dominique Gaïti. Dynamic Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: a Solution based on Multiagent

- Systems. *International Journal on Advances in Telecommunications* 3.3 and 4 (2011): 90-101.
- [84] Usama, Mir, Merghem-Boulaïha Leila, and Gaïti Dominique. COMAS: a cooperative multiagent architecture for spectrum sharing. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2010 (2011).
- [85] Li, Husheng. Multi-agent Q-learning of channel selection in multi-user cognitive radio systems: A two by two case. *Systems, Man and Cybernetics, 2009. SMC 2009. IEEE International Conference on. IEEE, 2009.*
- [86] Xie, Jiang, Ivan Howitt, and Anita Raja. Cognitive radio resource management using multi-agent systems. *IEEE CCNC. 2007.*
- [87] Wu, Cheng, et al. Spectrum management of cognitive radio using multi-agent reinforcement learning. *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Industry track. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010.*
- [88] Yau, K-LA, Peter Komisarczuk, and Paul D. Teal. Enhancing network performance in distributed cognitive radio networks using single-agent and multi-agent reinforcement learning. *Local Computer Networks (LCN), 2010 IEEE 35th Conference on. IEEE, 2010.*
- [89] Yau, K-LA, Peter Komisarczuk, and Paul D. Teal. Achieving context awareness and intelligence in distributed cognitive radio networks: a payoff propagation approach. *Advanced Information Networking and Applications (WAINA), 2011 IEEE Workshops of International Conference on. IEEE, 2011.*
- [90] Galindo-Serrano, Ana, and Lorenza Giupponi. Aggregated interference control for cognitive radio networks based on multi-agent learning. *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2009. CROWNCOM'09. 4th International Conference on. IEEE, 2009.*
- [91] Li, Jiandong, and Chungang Yang. A Markovian game-theoretical power control approach in cognitive radio networks: A multi-agent learning perspective. *Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2010 International Conference on. IEEE, 2010.*
- [92] Mir, Usama, et al. A continuous time Markov model for unlicensed spectrum access. *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2011 IEEE 7th International Conference on. IEEE, 2011.*
- [93] Amraoui, Asma, Wassila Baghli, and Badr Benmammar. Improving video conferencing application quality for a mobile terminal through cognitive radio. *Communication Technology (ICCT), 2012 IEEE 14th International Conference on. IEEE, 2012.*
- [94] Amraoui, Asma, et al. Toward cognitive radio resource management based on multi-agent systems for improvement of real-time application performance. *New*

- Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2012 5th International Conference on. IEEE, 2012.
- [95] Dai, Zuoran, et al. Vertical handover criteria and algorithm in IEEE802. 11 and 802.16 hybrid networks. Communications, 2008. ICC'08. IEEE International Conference on. IEEE, 2008.
- [96] Busanelli, Stefano, et al. Vertical handover between WiFi and UMTS networks: experimental performance analysis. International Journal of Energy, Information and Communications 2.1 (2011): 75-96.
- [97] Olivier. Duro, William Hoarau, Systeme Multi-Agents. 2004.
- [98] Moujahed.S. Approche multi-agents auto-organisée pour la résolution de contraintes spatiales dans les problèmes de positionnement mono et multi-niveaux. Thèse de doctorat de l'université de Belfort-Montbéliard. 2007

## Liste de publications

### Articles de revues internationales avec comité de lecture et de sélection (2)

1. A. Amraoui, B. Benmammar and F. Krief. "Cognitive Radio Resource Management Using Multi-Agent Systems, Auctions and Game Theory". WSEAS Transactions on Computers. Volume 13, 2014, pp. 463-475.  
Print ISSN: 1109-2750, E-ISSN: 2224-2872.  
**Répertoriée:** Scopus | Elsevier, SJR (2013) = 0.218.
2. B. Benmammar, A. Amraoui and F. Krief. "A Survey on Dynamic Spectrum Access Techniques in Cognitive Radio Networks". International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS). Vol. 5, No. 2, August 2013, pp: 68-79.  
Print ISSN: 2076-0930, E-ISSN: 2073-607X.  
**Répertoriée:** Scopus | Elsevier, SJR (2013) = 0.211.

### Livres et chapitres de livres avec comité de lecture et de sélection (2)

3. A. Amraoui and B. Benmammar. "Dynamic Spectrum Access Techniques State of the art" (Book Chapter), dans le livre: "Cognitive Radio Technology Applications for Wireless and Mobile Ad hoc Networks", IGI Global Publishers, Hershey, PA, USA, June 2013. Pages: 31-48.  
DOI: 10.4018/978-1-4666-4221-8, ISBN13: 9781466642218, ISBN10: 1466642211, EISBN13: 9781466642225.
4. B. Benmammar and A. Amraoui. "Radio Resource Allocation and Dynamic Spectrum Access (FOCUS Series)". (Book), Wiley-ISTE Edition.  
ISBN-10: 1848214456, ISBN-13: 978-1848214453.  
**Répertorié:** ACM Digital Library.  
Paru dans la lettre de l'URSI France (Union Radio-Scientifique Internationale) N°9 - Mars 2013.

### Articles d'actes de conférences internationales avec comité de lecture et de sélection (4)

5. A. Amraoui, B. Benmammar, F. Krief and FT. Bendimerad. "Auction-based Agent Negotiation in Cognitive Radio Ad Hoc Networks", Proceedings of the Fourth International ICST Conference, ADHOCNETS 2012, Paris, France, October 16-17, 2012, Revised Selected Papers Series: Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, Vol. 111. pp. 119-134, Springer Edition (2013). DOI: 10.1007/978-3-642-36958-2\_9, Print ISBN: 978-3-642-36957-5, Online ISBN: 978-3-642-36958-2.  
**Répertoriée:** DBLP et Scopus | Elsevier.

6. A. Amraoui, FZ. Benidris, B. Benmammar, F. Krief and FT. Bendimerad. "Toward cognitive radio resource management based on multi-agent systems for improvement of real-time application performance". Proceedings of the Fifth IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS'2012). Istanbul, Turkey. 7-10 May 2012.  
ISSN: 2157-4952, ISBN: 9781467302289, DOI: 10.1109/NTMS.2012.6208727.  
Page(s): 288-291.  
**Répertoriée:** DBLP, IEEE Xplore Digital Library et Scopus | Elsevier.
7. A. Amraoui, B. Benmammar, F. Krief and FT. Bendimerad. "Négociations à base d'Enchères dans les Réseaux Radio Cognitive". Dans les actes de Nouvelles Technologies de la répartition - Ingénierie des protocoles (NOTERE/CFIP 2012). Éditeur Cépaduès, ISBN : 9782364930452.  
**Répertoriée:** Scopus | Elsevier.
8. A. Amraoui, B. Benmammar and FT. Bendimerad. "Garantir les performances des applications temps réel en se basant sur la radio cognitive", Proceedings of the International Conference on Multimedia Information Processing (ICMIP'2012), April 09-11th, 2012 Mascara, Algeria.

#### **Articles d'actes de conférences nationales avec comité de lecture et de sélection (2)**

9. A. Amraoui, B. Benmammar and FT. Bendimerad. "Utilisation des Enchères dans les Réseaux Radio Cognitifs pour l'Accès Dynamique au Spectre". Première Conférence Nationale sur les Télécommunications (CNT'2012), Session Orale, 11, 12 Novembre 2012, Guelma, Algérie.
10. A. Amraoui, B. Benmammar and FT. Bendimerad. "Accès Dynamique au Spectre dans le Contexte de la Radio Cognitive". Dans les actes de la 2<sup>ème</sup> édition de la conférence nationale de l'informatique (JEESI'12), 16, 17 Avril 2012 - ESI, Oued-Smar (Alger), Algérie.

#### **Communications orales (1)**

11. A. Amraoui. "Vers une Architecture Multi-agents pour la Radio Cognitive Opportuniste", Premières Journées du Laboratoire de Télécommunications (JLTT' 2014), du 27 au 30 Avril 2014, Tlemcen, Algérie.

## Annexe A

### Plateforme JADE

JADE est une plate-forme multi-agents créée par le laboratoire TILAB. Elle permet le développement de systèmes multi-agents. Elle est implémentée entièrement en JAVA.

Chaque instance de JADE est appelée conteneur et peut contenir plusieurs agents. Ainsi, un ensemble de conteneurs constitue une plateforme et chaque plateforme doit contenir un conteneur spécial appelé *main-container* et tous les autres conteneurs s'enregistrent auprès de celui-là dès leur lancement.

Le *main-container* se distingue des autres conteneurs car il contient toujours deux agents spéciaux appelés AMS (**Agent Management System**) et DF (**Director Facilitator**) qui se lancent automatiquement avec le main-container.

La plateforme contient également d'autres modules tels que le Dummy Agent, le Sniffer Agent et l'Introspector Agent.

La plateforme multi-agents JADE peut être distribuée sur plusieurs machines (pas nécessairement le même système d'exploitation) et les configurations peuvent être modifiées au démarrage des agents en les déplaçant d'une machine à une autre, ce qui permet une très grande portabilité des agents.

#### Architecture logicielle de JADE

JADE fournit une couche homogène qui cache complètement la complexité et la diversité du réseau des agents et possède une architecture très précise permettant la construction normalisée d'agents [38].

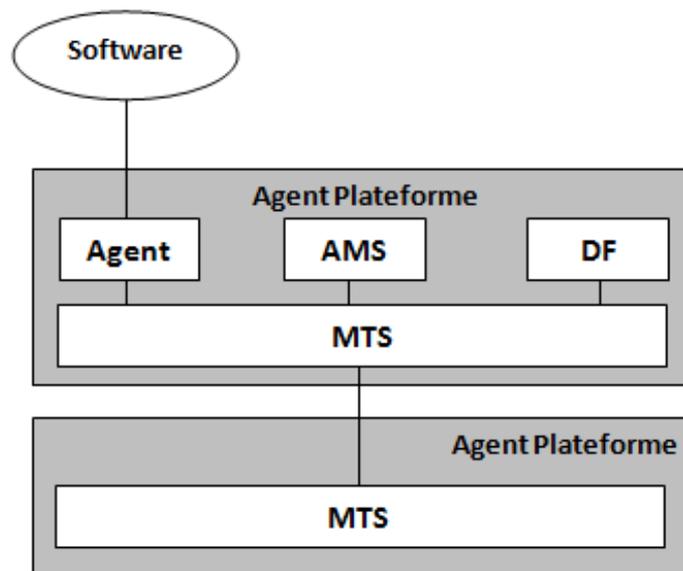


Figure A1: Architecture logicielle de la plate-forme JADE

## Communication entre agents et FIPA ACL

Pour parler d'un véritable système multi-agents et non pas d'un ensemble d'agents agissant d'une manière individuelle, il est nécessaire de voir comment les agents communiquent et s'échangent les messages.

Chaque agent JADE possède une sorte de boîte aux lettres sous forme d'une liste qui contient les messages « conformes aux spécifications de la FIPA » qui lui sont envoyés par les autres agents selon l'ordre chronologique de leur arrivée.

La classe *ACLMessage* du package *jade.lang.acl* de JADE représente les messages qui peuvent être échangés par les agents. Cependant, les informations nécessaires pour envoyer un message JADE sont: l'ensemble des récepteurs du message, le contenu du message et l'acte de communication. Cependant, La communication de messages se fait en mode asynchrone.

Lorsqu'un agent souhaite envoyer un message, il doit créer un nouvel objet *ACLMessage*, compléter ces champs avec des valeurs appropriées et enfin appeler la méthode *send()* et lorsqu'un agent souhaite recevoir un message, il suffit d'appeler la méthode *receive()* ou la méthode *blockingReceive()* de la classe *Agent* pour récupérer le premier message non encore lu de l'agent. Cependant, tous les attributs de la classe *ACLMessage* peuvent être obtenus et modifiés par les setters et getters [38].

La communication permet de lier un ensemble d'agents et permet d'augmenter les capacités perceptives des agents en leur permettant de bénéficier des informations et du savoir-faire des autres agents. Sans communication, un agent n'est qu'un individu isolé, sourd et muet qui ne fait qu'agir sur lui-même. La communication donc s'appuie sur des langages de communication standards.

FIPA ACL (FIPA Agent Communication Language) est un langage de communication entre agents créé par FIPA dont la spécification consiste en un ensemble de types de messages et en un ensemble de protocoles d'interaction de haut niveau. Le but de FIPA ACL est d'interagir entre les agents quelque soit le protocole qu'ils utilisent.

Les actes de communication sont accomplis à travers l'envoi de messages d'un agent à un autre en utilisant les spécifications établies par la FIPA. Un message FIPA ACL contient un ensemble de paramètres. Le seul paramètre obligatoire est la « performative ». Néanmoins, la plupart des messages doivent contenir des paramètres tels que l'expéditeur, le destinataire et le contenu.

Performative	Signification
<b>accept-proposal</b>	Communication de l'accord de l'expéditeur d'effectuer une action qui lui a été préalablement soumise.
<b>Agree</b>	Communication de l'accord de l'expéditeur pour effectuer une action, sans doute dans le futur.
<b>Cancel</b>	Communication de l'annulation de l'accord donnée préalablement par l'expéditeur pour effectuer une action.
<b>Cfp</b>	Communication par l'expéditeur d'une demande d'effectuer une certaine action.
<b>Confirm</b>	Communication par l'expéditeur de la confirmation de la validité (selon

	les règles de l'agent) de la proposition préalablement reçue.
<b>disconfirm</b>	Communication par l'expéditeur de la confirmation de la non validité (selon les règles de l'agent) de la proposition préalablement reçue.
<b>Failure</b>	Communication par l'expéditeur de l'échec d'une action essayée.
<b>Inform</b>	Communication par l'expéditeur d'une proposition, pensée vrai par celui-ci.
<b>inform-if</b>	Communication par l'expéditeur d'une proposition (pensée vrai par celui-ci), et demande au receveur une confirmation ou une non-confirmation.
<b>Inform Ref</b>	inform-ref
<b>not-understood</b>	Communication par l'expéditeur d'un non compréhension d'une action effectuée par le destinataire.
<b>propagate</b>	Communication par l'expéditeur d'un message à propager à des agents dont la description est fournie. Le destinataire du message traite le sous-message à propager comme s'il lui était directement destiné et envoie le message "propagate" à l'agent qu'il a identifié
<b>propose</b>	Communication par l'expéditeur d'une proposition d'action conditionnée à certaines pré conditions données.
<b>Proxy</b>	Communication par l'expéditeur d'une demande d'une transmission d'un message à des agents dont la description est donnée.
<b>query-ref</b>	Communication par l'expéditeur d'une demande par l'expéditeur de l'objet référencé par une expression.
<b>Refuse</b>	Communication par l'expéditeur de son refus d'effectuer une action donnée, et en donne les raisons.
<b>reject-proposal</b>	Communication, pendant une négociation, par l'expéditeur de son refus d'effectuer des actions.
<b>Request</b>	Communication par l'expéditeur d'une demande au destinataire d'effectuer une action.
<b>request-when</b>	Communication par l'expéditeur d'une demande, au destinataire, d'effectuer une action quand une proposition donnée devient vrai.
<b>request-whenever</b>	Communication par l'expéditeur d'une demande, au destinataire, d'effectuer une action dès qu'une proposition devient vrai, et à chaque fois que celle-ci redevient vrai.
<b>subscribe</b>	Communication par l'expéditeur d'une demande d'un objet donnée par une référence envoyé par l'expéditeur, et de renotifier l'agent ayant souscrit dès que l'objet en question change.

Tableau A1: actes de communication du modèle FIPA ACL [97]

## Annexe B

### Exemple de l'algorithme TOPSIS

Le client désire acheter une voiture et ne sait pas laquelle choisir parmi les marques suivantes (Civic, Saturn, Ford, Mazda). L'algorithme TOPSIS peut aider le client à faire le meilleur choix en se basant sur les critères suivants:

- Style ;
- Fiabilité ;
- Carburant Eco ;
- Coût.

Poids  $w_j = \{0.1, 0.4, 0.3, 0.2\}$  respectivement pour les critères cités auparavant.

#### Matrice de décision :

	Style	Fiabilité	Carburant Eco.	Coût
Civic	7	9	9	8
Saturn	8	7	8	7
Ford	9	6	8	9
Mazda	6	7	8	6

#### Étape 1: Calcul des préférences normalisées

Pour la construction d'une matrice normalisée, il faut multiplier chaque colonne par  $(\sum x_{ij}^2)^{1/2}$  pour avoir  $r_{ij}$ .

	Style	Fiabilité	Carburant Eco.	Coût
Civic	0.46	0.61	0.54	0.53
Saturn	0.53	0.48	0.48	0.46
Ford	0.59	0.41	0.48	0.59
Mazda	0.40	0.48	0.48	0.40

#### Étape 2: Calcul des préférences normalisées avec des poids associés aux critères

Pour la construction d'une matrice normalisée et pondérée, il faut multiplier chaque colonne par  $w_j$  pour obtenir  $V_{ij}$ .

	Style	Fiabilité	Carburant Eco.	Coût
Civic	0.046	0.244	0.162	0.106
Saturn	0.053	0.192	0.144	0.092
Ford	0.059	0.164	0.144	0.118
Mazda	0.040	0.192	0.144	0.080

**Étape 3: Identification des solutions idéales et anti-idéales**

Déterminer la solution idéale

$$A^+ = \{0.059, 0.244, 0.162, 0.080\}$$

Déterminer la solution anti-idéale

$$A^- = \{0.040, 0.164, 0.144, 0.118\}$$

**Étape 4: Calcul des distances de séparation**

$$S_i^* = [\sum (v_j^* - v_{ij})^2]^{1/2}$$

	Style	Fiabilité	Carburant Eco.	Coût
Civic	$(0.046 - 0.059)^2$	$(0.244 - 0.244)^2$	$(0.162 - 0.162)^2$	$(0.106 - 0.080)^2$
Saturn	$(0.053 - 0.059)^2$	$(0.192 - 0.244)^2$	$(0.144 - 0.162)^2$	$(0.092 - 0.080)^2$
Ford	$(0.059 - 0.059)^2$	$(0.164 - 0.244)^2$	$(0.144 - 0.162)^2$	$(0.118 - 0.080)^2$
Mazda	$(0.040 - 0.059)^2$	$(0.192 - 0.244)^2$	$(0.144 - 0.162)^2$	$(0.080 - 0.080)^2$

Distance idéale

<b>Civic</b>	0.000845	<b>0.029</b>
<b>Saturn</b>	0.003208	<b>0.057</b>
<b>Ford</b>	0.008186	<b>0.090</b>
<b>Mazda</b>	0.003389	<b>0.058</b>

Distance anti-idéale

<b>Civic</b>	0.006904	<b>0.083</b>
<b>Saturn</b>	0.001629	<b>0.040</b>
<b>Ford</b>	0.000361	<b>0.019</b>
<b>Mazda</b>	0.002228	<b>0.047</b>

**Étape 5: Calcul de l'index de similarité à la solution idéale**

$$C_i^* = S_i^- / (S_i^* + S_i^-)$$

<b>Civic</b>	0.083/0.112	<b>0.74</b>	→ <b>Meilleure solution</b>
<b>Saturn</b>	0.040/0.097	<b>0.41</b>	
<b>Ford</b>	0.019/0.109	<b>0.17</b>	
<b>Mazda</b>	0.047/0.105	<b>0.45</b>	

## Résumé

La radio cognitive est une technologie qui permet de résoudre le problème de pénurie du spectre de radiofréquences due à l'évolution et à la multiplication des systèmes de transmission sans fil. En effet, elle permet d'exploiter d'une manière dynamique et opportuniste les bandes de fréquences inutilisées durant l'absence des utilisateurs prioritaires grâce aux techniques d'accès dynamique au spectre.

Dans cette thèse, nous utilisons les systèmes multi-agents car c'est une excellente approche pour assurer un contrôle autonome dans les systèmes dont les caractéristiques sont très dynamiques. Notre contribution de base est de proposer une nouvelle architecture à base de multi-agents dans le contexte radio cognitive. Cette dernière est composée de trois niveaux complémentaires: physique, cognitif et comportemental.

Afin de valider cette architecture et assurer une gestion optimale du spectre, nous avons effectué plusieurs expérimentations. Nos approches sont en effet une combinaison entre la théorie des enchères, les techniques d'aide à la décision multi critères, les formations de coalitions et les systèmes multi-agents dans le cadre des réseaux de radio cognitive.

## Mots-clés

Radio cognitive - accès dynamique au spectre - systèmes multi-agents - architecture multi-agents - théorie des enchères - aide à la décision multicritères - coalitions.

## Abstract

Cognitive radio is a technology that solves the problem of radio spectrum scarcity due to the evolution and proliferation of wireless transmission systems. Indeed, it allows to exploit the unused frequency bands with a dynamic and opportunistic manner during the absence of primary users through dynamic spectrum access techniques.

In this thesis, we use multi-agent systems as it is an excellent approach to ensure an autonomous control in systems where characteristics are very dynamic. Our main contribution is to propose a new architecture based on multi-agents in the context of cognitive radio. It consists of three fully complementary levels: physical, cognitive and behavioral.

To validate this architecture and ensure an optimal spectrum management, we conducted several experiments. Our approaches are indeed a combination of auction theory, multi-criteria decision aid techniques, coalition's formations and multi-agent systems in cognitive radio networks.

## Keywords

Cognitive radio - dynamic spectrum access - multi-agent systems - multi-agent architecture - auction theory - multi-criteria decision aid - coalitions.

## ملخص

الرّاديو الادراكي (المعرفي) تكنولوجيا مستعملة لحلّ مشكلة النقص في الطيف الراديوي نظرا لتطور وانتشار أنظمة الإرسال اللاسلكية. في الواقع، إنّها تسمح باستغلال الترددات غير المستعملة من طرف المستخدمين الأوليين بطريقة ديناميكية وانتهازية من خلال تقنيات وصول الطيف الديناميكية.

في هذه الأطروحة، استعملنا الأنظمة متعدّدة الوكلاء التي تعتبر نهج ممتاز لتأمين الحكم الذاتي في الأنظمة ذات خصائص ديناميكية. مساهمتنا الأساسية هي اقتراح هيكل جديد يعتمد على تعدد الوكلاء في سياق الرّاديو الإدراكي. ويتكوّن هذا الأخير من ثلاثة مستويات متكاملة تماما: الفيزيائية، المعرفية والسلوكية.

للتحقّق من صحّة هذا الهيكل وضمان الإدارة المثلى للطيف، أجرينا عدّة تجارب. مناهجنا هي في الواقع مزيج من نظرية المزايدة، تقنيات دعم القرارات متعدّدة المعايير، تشكيلات الائتلافات والأنظمة متعدّدة الوكلاء في شبكات الرّاديو الإدراكية.

## الكلمات المفتاحية

الرّاديو الإدراكي - الوصول الديناميكي للطيف - الأنظمة متعدّدة الوكلاء - الهياكل متعدّدة الخدمات - نظرية المزايدة - دعم القرارات متعدّدة المعايير - الائتلافات.