

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE BATNA 2**



**Faculté des Mathématiques et Informatique**

**Thèse de Doctorat**

Présentée par :

**Mr GOURDACHE SAMIR**

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT** en **SCIENCES**:

**Filière : Informatique**

**Option : Ingénierie des Systèmes Informatiques**

**TITRE : Réseaux Sans Fil Hétérogènes**  
**Architecture Et Protocoles**

**Devant le jury composé de :**

Mr Sedrati	Maamar	MCA	Université de Batna 2	Président
Mr Bilami	Azeddine	Pr	Université de Batna 2	Rapporteur
Mr Maamri	Ramdane	Pr	Université de Constantine 2	Examineur
Mr Zitouni	Abdelhafid	Pr	Université de Constantine 2	Examineur
Mr Boubiche	Djalal Eddine	Pr	Université de Batna 2	Examineur
Mr Merah	El Kamel	MCA	Université de Khenchela	Examineur

*A mes parents et à ma famille*

*avec*

*toute mon affection et ma reconnaissance*

## *Remerciements*

*Je tiens à remercier Mr Bilami azeddine pour avoir accepté de diriger ce travail, pour avoir eu confiance en mes choix, et pour sa patience. Mes remerciements vont aussi à messieurs les membres du jury qui ont bien voulu examiner et évaluer ce travail. Je remercie également tous ceux qui, administrativement, ont œuvré pour rendre cette soutenance possible. Je ne saurais, enfin, oublier tous ceux qui nous ont exprimé leurs sentiments sincères de nous voir arrivé au bout de notre chemin.*

## الملخص

يعد الطلب الهائل على السعة محركاً رئيسياً للتطور، بأشكال مختلفة، لشبكات الاتصالات اللاسلكية الحالية والمستقبلية. لمواجهة هذا التحدي، هناك حاجة إلى مزيد من الطيف اللاسلكي، الاستخدام الفعال له، وبنى الشبكات المناسبة. في هذه الأطروحة، نقدم حلاً مفاهيمياً يعتمد على شبكة خلوية مستوحاة من الراديو المعرفي لدمج موارد الطيف غير المستخدمة لشبكات لاسلكية مختلفة في شبكة لاسلكية متنقلة واحدة غير متجانسة. نصف البنية المفاهيمية لهذه الشبكة التكاملية، المسماة I-CRICNet (دمج الشبكة الخلوية المستوحاة من الراديو المعرفي)، ونقدم مخططاً تعاونياً لاستخدام الطيف يوفر للشبكة الأولى موارد طيفية. في المخطط الأخير، نستخدم بشكل مكثف التسلسلات المترابطة (CSS) لأغراض تشوير الأحداث. هذا الاختيار مدفوع بالخصائص المثيرة للاهتمام بشكل خاص لتتابعات CSS، وهي قصر المدة، والمتانة لظروف الراديو السيئة، والكشف بدلاً من فك التشفير، واحتمال الاصطدام المنخفض. في شبكة I-CRICNet، تم تجهيز كل من معدات المستخدم والمحطات القاعدية بنظام هوائي مزدوج. نقترح مخططاً عاماً للتشوير والكشف عن فرص موارد الراديو (RROS) ينطبق على سياقات لاسلكية مختلفة، نضيف إليها فكرة الترحيل إلى نطاقات طيف مختلفة، فضلاً عن دعم المستوى الثاني من التعاون. نقوم باختبار اقتراحنا مقابل السيناريوهات المختلفة التي تم إنشاؤها من خلال الجمع بين أنظمة الهوائيات المزدوجة ومصادر SRO. كتوضيح، نقترح مخطط تشوير وكشف في سياق أنظمة OFDMA ونوفر نتائج أداء من عمليات المحاكاة للتحقق من صحة اقتراحنا. نقوم أيضاً بصياغة احتمالية الكشف والإنذار الخاطئ ومتوسط الإنتاجية واستهلاك الطاقة للمخطط التعاوني. أخيراً، يتم إجراء تحليل التداخل لدعم الترحيل.

**الكلمات المفتاحية:** الشبكات غير المتجانسة، شبكات الراديو المعرفية، جمع الطيف الترددي، الوصول الانتهازي، تنقل الطيف، الوصول إلى الطيف والاستماع إليه، تكامل الشبكة، التسلسلات المترابطة، عملية نقطة بواسون، تقنيات الوصول إلى الراديو، أنظمة تخصيص الطيف.

---

# *RESUME*

---

La demande massive de capacité, est un moteur principal de l'évolution, sous différentes formes, des réseaux de communications sans fil actuels et à venir. Pour faire face à ce défi, on a besoin de davantage de spectre sans-fil, d'une utilisation efficace ce spectre et d'architectures de réseaux adéquates. Dans cette thèse, nous présentons une solution conceptuelle basée sur un réseau cellulaire d'inspiration radio-cognitive pour intégrer les ressources spectrales inutilisées de différents réseaux sans-fil dans un seul réseau mobile hétérogène sans-fil. Nous décrivons l'architecture conceptuelle de ce réseau intérateur, appelé réseau cellulaire intérateur d'inspiration radio cognitive (I-CRICNet pur Integrating Cognitive Radio Inspired Cellular Network), et nous présentons un schéma coopératif générique d'utilisation du spectre qui permet au premier réseau de disposer de ressources spectrales. Dans ce dernier schéma, nous faisons un usage intensif de séquences cross-corrélées (CSS), à des fins de signalisation d'événements. Ce choix est motivé par les caractéristiques particulièrement intéressantes des séquences CSS, à savoir la brièveté de la durée, la robustesse aux mauvaises conditions radio, la détection plutôt que le décodage et la faible probabilité de collision. Dans le réseau I-CRICNet, aussi bien les équipements utilisateurs que les stations de base sont dotés d'un double système d'antennes. Nous proposons un schéma générique de signalement et de détection des opportunités de ressources radio (ORSs) qui s'applique à divers contextes sans-fil, auquel nous ajoutons la notion de migration vers des bandes de spectre différentes, ainsi que le support d'un deuxième niveau de coopération. Nous mettons à l'épreuve notre proposition en la confrontant aux divers scénarios créés par la combinaison des systèmes de double antennes et les sources des OSRs. A titre d'illustration, nous proposons un schéma de signalement et de détection, dans le contexte des systèmes OFDMA et fournissons des résultats de performance issus de simulations pour valider notre proposition. Nous formulons aussi la probabilité de détection, de la fausse alarme, du débit moyen, et de la consommation d'énergie, pour le schéma coopératif. Enfin, une analyse des interférences et conduite pour supporter la migration.

**Mots Clés :** Réseaux hétérogènes, Réseaux radio cognitifs, Collecte de spectre, Accès opportuniste, Mobilité du spectre, Accéder et écouter le spectre, Intégration de réseaux, Séquences cross-corrélées, Processus ponctuel de poisson, Techniques d'accès radio, Régimes d'allocation du spectre.

---

# *ABSTRACT*

---

The massive demand for capacity is a key driver for the evolution, in various forms, of current and future wireless communications networks. To meet this challenge, more wireless-spectrum, efficient spectrum utilization, and appropriate network architectures are needed. In this thesis, we present a conceptual solution based on a radio-cognitive inspired cellular network to integrate the unused spectrum resources of different wireless networks into a single heterogeneous mobile wireless network. We describe the conceptual architecture of this integrating network, called I-CRICNet (for Integrating Cognitive Radio Inspired Cellular Network), and present a cooperative spectrum utilization scheme that provides the first network with spectral resources. In the latter scheme, we make extensive use of cross-correlated sequences (CSS) for event signaling purposes. This choice is motivated by the particularly interesting characteristics of CSS sequences, namely short duration, robustness to poor radio conditions, detection rather than decoding, and low collision probability. In the I-CRICNet network, both user equipment and base stations are equipped with a dual antenna system. We propose a generic Radio Resource Opportunity Signaling and Detection (RROS) scheme that applies to various wireless contexts, to which we add the notion of migration to different spectrum bands, as well as support for a second level of cooperation. We test our proposal against the various scenarios created by the combination of dual antenna systems and SRO sources. As an illustration, we propose a signaling and detection scheme in the context of OFDMA systems and provide performance results from simulations to validate our proposal. We also formulate the probability of detection, false alarm, average throughput, and energy consumption, for the cooperative scheme. Finally, an interference analysis is conducted to support the migration.

**Keywords:** heterogeneous networks, cognitive radio networks, spectrum harvesting, opportunistic access, spectrum mobility, accessing and listening to spectrum, network integration, cross-correlated sequences, Poisson point process, radio access techniques, spectrum allocation schemes.

## Abréviations

AGA	Accès Général Autorisé
ANR	Autorité Nationale de Régulation
APA	Accès Partagé Autorisé
APL	Accès Partagé sous-Licence
ASP	Agrégation de Segments de Porteuses
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BOA	Bande Opérationnelle Actuelle
BR	Bloc de Ressource
BSR	Best Selection Reporting
CAPEX	Capital Expenditure
CCC	Canal de Contrôle Cognitif
CDMA	Code Division Multiple Access
CF	Centre de Fusion
CM	Coexistence Manager
CoMP	Coordinated Multipoint Transmission
CP	Cyclic Prefix
CPE	Custum Premise Equipment
CSAT	Carrrier-Sensing-Adaptive Transmission
DCSS	Détection coopérative Sélective Supérieure
DFS	Dynamic Frequency Selection
DL	Downlink (voie descendante)
ECL	Evaluation de Canal Libre (clear channel assessment)
eICIC	enhanced ICIC
EPC	Evolved Packet Core
EU	Equipement Utilisateur
FBE	Frame Based Equipment
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFR	Fractional Frequency Reuse
FFT	Fast Fourier Transform
FGM	Fonction Génératrice de Moments
FSC	Formation-de-Faisceaux-Coordonnée
GI	Grille Intelligente
GDS	Gestion Dynamique du Spectre
HetNets	Heterogeneous Networks
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
I-CRICNet	Integrating Cognitive Radio Inspired Network
IEC	Information sur l'Etat du Canal
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMT	International Mobile Communications
IoSD	Internet of Spectrum Devices
LAP	Licence d'Accès Prioritaire
LAT	Listen And Talk
LBE	Load Based Equipment
LBT	Listen Before Talk
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MSB	Micro Serveur de Bord

NBP	Nœud de Basse Puissance
NC-OFDM	OFDM Non Contigüe
OC	Ordonnancement-Coordonné
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operational Expenditure
ORM	Opérateur de Réseau Mobile
OSR	Opportunité de Spectre Radio
PAP	Probabilité A Posteriori
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCC	Primary Component Carrier
RAR	Réseau d'Accès Radio
RC	Radio Cognitive
RF	Radio Frequency
RRC	Réseau Radio Cognitif
RSFHs	Réseaux Sans-Fil Hétérogènes
RSR	Random Selection Reporting
SA	Spectrum Autmaton
SAD	Système d'antennes distribuées
SB	Station de Base
SBC	Station de Base Cognitive
SBP	Station de Base Primaire
SCC	Secondary Component Carrier
SCD	Système Cognitif Dynamique
SINR	Signal to Interference plus Noise Ration
SM	Spectrum Manager
SMD	Spectrum Monitoring Device
SNR	Signal to Noise Ratio
SPT	Sélection-de-Point-de-Transmission
SSF	Spectrum Sensing Function
SUD	Spectrum Utilizing Device
TAR	Technologie d'Accès Radio
TC	Transmission-Concertée
TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TEM	Taux d'Erreur Moyen
TRE	Tête Radio Eloignée
TVWS	TV White Space
UAR	Unité d'Allocation de Ressources
UP	Utilisateur Primaire
US	Utilisateur Secondaire
WSO	White Space Object

## Liste des Figures et Tableaux

Figure 1 a) Réseau homogène b) Réseau hétérogène.....	14
Figure 2 Classification Générale des Techniques CoMP : a) OC b) FSC c) TC d) SPT.....	15
Figure 3 Réutilisation Fractionnée des Fréquences.....	16
Figure 4 Coopération par Echange de Bande Passante.....	17
Figure 5 Transmission multi opérateurs sur un pool de spectre.....	18
Figure 6 Location mutuelle coordonnée inter-opérateurs via une entité tierce centrale.....	19
Figure 7 Aperçu des parties prenantes clés et des éléments du concept APL.....	20
Figure 8 Cycle du partage de spectre opportuniste.....	21
Figure 9 Architecture réseau cognitif.....	22
Figure 10 Récoltes de Spectre coopératives.....	23
Figure 11 Spectre des bandes des espaces blancs TV.....	25
Figure 12 a) Diagramme d'interface radio cognitive pour le standard IEEE 802.22 ; b) Structure de la Trame IEEE 802.22.....	27
Figure 13 Méthodes d'allocation de canal.....	29
Figure 14 Structure de la super trame MAC.....	31
Figure 15 Deux modes d'opération de LTE-U : mode voie descendante supplémentaire et TDD.....	33
Figure 16 Exemple d'une topologie de réseau LTE-U.....	34
Figure 17 Illustration d'un déploiement LTE-A/WiFi.....	37
Figure 18 Implémentation de LTB basé-charge sur une structure LTE basé-trame.....	39
Figure 19 Implémentation de LTB basé-charge sur structure LTE basé-trame, préambule chevauche sur deux sous-trames.....	40
Figure 20 Topologie d'un réseau multi radio convergent.....	41
Figure 21 La couche virtuelle ORCHESTRA se trouve au-dessus de la couche de liaison de données et agit elle-même comme une couche de liaison de données vers la couche réseau.....	43
Figure 22 Architecture de nuage de spectre pour un Internet des dispositifs de Spectre (IoSD) sur les futurs réseaux sans fil.....	45
Figure 23 a) Description du partage de spectre sous forme maillée pour réseaux sans fil futurs ; b) système cognitif dynamique au centre de la gestion dynamique de spectre dans les réseaux de communications sans fil complexes.....	46
Figure 24 Diagramme de blocs du CDS.....	47
Figure 25 OSRs dans réseaux TDMA.....	50
Figure 26 Architecture du réseau I-CRICNet.....	54
Figure 27 Déroulement chronologique d'un échange de paquet avec un contrôle codé versus un message de control.....	57
Figure 28 Chronologie des événements du schéma de notification.....	59
Tableau 1 Types d'évènements leurs interprétation et implémentation.....	60
Tableau 2 Structure de la base de données de contextes et valeurs des attributs.....	61

Tableau 3 Scénarios illustratifs (instanciation de la base de données de contextes).....	63
Figure 29 Diagramme de blocs du double système d’antennes équipant les SBCs, UPs, et USs.....	65
Figure 30 Situation de départ de la migration.....	66
Figure 31 Situation à cheval entre deux bandes.....	67
Figure 32 Situation finale de la migration.....	68
Figure 33 Architectures réseaux sans fils.....	71
Figure 34 Schémas de notification d’occurrence d’OSR mode réunies&groupés.....	73
Figure 35 Schéma de notification d’extinction d’OSR mode réunies&groupés.....	74
Figure 36 Schéma de notification d’occurrence d’OSR mode séparés&divisés à l’antenne en réception.....	75
Figure 37 Schéma de notification d’extinction d’OSR mode séparés&divisés à l’antenne en réception.....	76
Figure 38 Schéma de notification d’occurrence d’OSR mode séparées&divisées à l’antenne en émission.....	76
Figure 39 Schéma de notification d’extinction d’OSR mode partagées&divisées à l’antenne en émission.....	77
Figure 40 Schéma de notification d’occurrence d’OSR mode partagées&groupées à l’antenne en réception.....	78
Figure 41 Schéma de notification d’occurrence d’OSR mode partagées&divisées à l’antenne en émission.....	78
Figure 42 Diagramme d’état UPs.....	79
Figure 43 Diagramme d’état SBC, antenne en réception.....	80
Figure 44 Diagramme d’état SBC, antenne en émission.....	81
Figure 45 Diagramme d’état US, antenne en réception.....	82
Figure 46 Diagramme d’état US, antenne en émission.....	82
Figure 46 Diagramme d’état US, antenne en émission.....	83
Figure 47 Diagramme de bloc détection d’énergie.....	86
Figure 48 Détection par filtre adapté.....	87
Figure 49 Déroulement chronologique de la notification de détection.....	89
Figure 50 Modèle double interrupteur du kième canal.....	90
Figure 51 Diagramme de bloc de la NC-OFDMA.....	91
Figure 52 Configuration physique des canaux de la BOA.....	94
Figure 53 Déroulement processus de captage coopératif.....	97
Figure 54 Détection de spectre coopérative sélective supérieure.....	99
Figure 55 Organigramme de la détection coopérative sélective supérieure.....	100
Figure 56 Diagramme de séquence : détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en mode réunies&groupées.....	104
Figure 57 Etapes de la détection dans I-CRICNet, antennes en mode réunies&groupées a) sans coopération ; b) coopération sélective supérieure.....	105
Figure 58 Diagramme de séquence : détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, OSR sur antennes en réception, mode séparée&groupées.....	106
Figure 59 Détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en réception, mode séparée&groupées a) sans coopération ; b) avec coopération.....	107
Figure 60 Diagramme de séquence : détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en émission, mode séparée&groupées.....	108

Figure 61 Détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en émission, mode séparée&groupées a) sans coopération ; b) avec coopération.....	109
Figure 62 Détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en réception, mode séparées&divisés a) sans coopération ; b) avec coopération.....	110
Figure 63 Diagramme de séquence : détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en réception, mode séparées&divisées.....	111
Figure 65 Diagramme de séquence : détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en émission, mode séparée&divisées.....	112
Figure 64 Détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en émission, mode séparée&divisées a) sans coopération ; b) avec coopération.....	113
Figure 66 Diagramme d'état d'un UP schéma de coopération sélective supérieure.....	114
Figure 67 Diagramme d'état SBC schéma de coopération sélective supérieure, antenne en mode émission.....	115
Figure 68 Diagramme d'état SBC schéma de coopération sélective supérieure, antenne en mode réception.....	116
Figure 69 Diagramme d'état US schéma de coopération sélective supérieure, antenne en mode réception.....	117
Figure 70 Diagramme d'état US schéma de coopération sélective supérieure, antenne en mode émission.....	119
Figure 71 TEM vs SNRs(Db), diverse fausses alarmes (SIR=0Db), canal Bruit Additif Blanc Gaussien.....	122
Figure 72 TEM vs SNRs(Db) diverses fausses alarmes, (SIR=0Db) canal Ricean.....	123
Figure 73 TEM vs SIR(Db) diverses valeurs SNR(Db).....	124
Figure 74 Probabilité de détection vs fausse alarme, diverses valeurs SNR(Db).....	124
Figure 75 TEM vs SNR(Db), SIR=0Db, pour diverse valeurs fausse alarme, UP unique.....	125
Figure 76 TEM vs SNR(Db), SIR=0Db, pour diverse valeurs fausse alarme, UPs multiples.....	126
Figure 77 TEM vs SNR(Db) pour différents nombre de symboles.....	127
Figure 78 Comparaison schéma proposée et schéma d'inspiration.....	127
Figure 79 Schéma de détection proposé vs Détection d'énergie (canal Bruit Gaussien Blanc Additif).....	128
Figure 80 Schéma de détection proposé vs Détection d'énergie (canal Rician).....	129
Figure 81 Coexistence I-CRICNet et un réseau primaire OFDMA.....	130
Figure 82 Sous-canaux constituant l'unité d'allocation des ressources.....	130
Tableau 4 Energie et débit pour le schéma coopératif.....	134
Figure 83 Réalisation d'un processus ponctuel de Poisson homogène.....	136
Figure 84 Modèle système pour l'analyse des interférences.....	137

## Table des Matières

### INTRODUCTION 1

### CHAPITRE 1

1	APPROCHES POUR L'EXPLOITATION DU SPECTRE	11
1.1	Les types de régimes de licences	12
1.2	Restructuration de Spectre	13
1.3	Densification des réseaux	13
1.4	Partage Du Spectre Sous-Licence	17
1.5	La Radio Cognitive	21
1.5.1	Une Architecture De RRC	22
1.5.2	Approches pour la collecte de spectre	23
1.5.3	Limites Des Approches de Collecte du Spectre	23
1.6	Exploitation du spectre sans licence	24
1.6.1	STANDARD IEEE 802.22	25
1.6.2	Standard ECMA-392	30
1.7	Agrégation de Spectre	32
	Modes Opératoires Dans LTE-U	32
1.8	Exploitation adaptative des spectres avec/sans licence	33
1.8.1	Techniques pour la coexistence LTE/WiFi	35
1.8.2	Architecture Unifiée Pour Communications Cellulaires Dans Les Spectres Avec/Sans Licence	37
1.9	Réseaux Multi-Radio Hétérogènes Convergents	41
1.9.1	Stations Multi-Radio	42
1.9.2	Le Framework ORCHESTRA	42
1.9.3	Architecture Basée sur le Cloud pour l'Internet de Dispositifs de Spectre	44
1.9.4	Systèmes Cognitifs Dynamiques (SCD)	45
1.10	Conclusion	48

### CHAPITRE 2

2	ARCHITECTURE ET SCHEMAS PROTOCOLAIRES DANS I-CRICNet	49
2.1	Les OSRs dans les réseaux hétérogènes	50
2.2	Restructuration du spectre dans I-CRICNet	52
2.3	Architecture du réseau I-CRICNet	53

2.4	Schéma opératoire intégré pour la collecte du spectre	55
2.5	Schéma générique de notification et de détection des OSRs	56
2.6	Schéma de notification des OSRs	58
2.7	Rôles et interactions des acteurs du schéma notification et détection	64
2.7.1	Rôles des différents acteurs dans la migration	64
2.7.2	Schémas de protocoles de la notification des OSRs	72
2.7.3	Rôles des différents acteurs dans la notification des OSRs	79
2.8	Conclusion	83

## **CHAPITRE 3**

### **3 SCHEMA COOPERATIF GENERIQUE DE COLLECTE DES OPPORTUNITES DE RESSOURCES RADIO 84**

3.1	Techniques de détection	85
3.1.1	Détection de l'énergie (Energy detection)	86
3.1.2	Détection par filtre adapté (Matched filter detection)	86
3.1.3	Détection de trait cyclo-stationnaire (cyclostationary feature detection)	87
3.2	Captage/Surveillance de spectre dans I-CRICNet	88
3.2.1	Schéma de détection des OSRs pour I-CRICNet	88
3.2.2	Modèle de spectre	89
3.2.3	Schéma de synchronisation	90
3.2.4	Performance du schéma de décision	95
3.3	Détection de spectre coopérative dans I-CRICNet	96
3.3.1	Détection de spectre coopérative traditionnelle	97
3.3.2	Détection de spectre coopérative sélective supérieure (DCSS)	98
3.3.3	Détection de spectre coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet	100
3.4	Conclusion	119

## **CHAPITRE 4**

4	ANALYSE ET EVALUATION DES PERFORMANCES	121
4.1	Résultats des simulations du schéma de détection de base	121
4.2	Etude des performances du schéma de détection coopératif	129
4.2.1	Modèle du système	129
4.3	Analyse de performances du schéma de détection coopératif	131
4.4	Formulation de la consommation d'Energie et du Débit Moyen	132

4.4.1	Débit moyen	133
4.4.2	Consommation d'énergie	133
4.5	Analyse de l'interférence Co-canal	134
4.5.1	Modèle du système	136
4.5.2	Analyse de l'interférence moyenne par canal	138
4.6	Conclusion	141
<b>CONCLUSION</b>		142
<b>REFERENCES</b>		151

---

# *INTRODUCTION*

---

Les réseaux de communications cellulaires mobiles sont confrontés à un grand défi pour tenir le rythme de la demande de trafic mobile, qui est en perpétuelle croissance, et offrir une meilleure qualité d'expérience utilisateur. Le nombre immense d'appareils de communication intelligents, à capacités de plus en plus accrues, et la popularité de diverses applications sans fil (gourmandes en médias) sont les facteurs moteurs principaux de cette croissance du trafic. Pour faire face à cette situation, sans précédent, les systèmes sans fil contemporains doivent impérativement étendre leurs capacités. À cette fin, trois options dominantes sont disponibles, à savoir : ajouter plus de spectre, densifier les réseaux, et améliorer l'efficacité de la gestion du spectre [1].

L'ajout de plus de spectre est intéressant car il reste l'option préférée des opérateurs de réseaux mobiles (ORMs), et puisque de nouveaux sites ne sont pas nécessaires, ce qui permet d'économiser des coûts importants et une planification de sites élaborée [2]. Malheureusement, force est de constater que le spectre sous licence continue d'être rare et coûteux ; la capacité et/ou les débits de données ne seront plus (tôt ou tard) suffisants, en raison des conditions de limitation de puissance, et les nouvelles bandes de spectre libérables sont susceptibles d'englober d'autres services primaires, déjà déployés sur ces bandes. Effacer ces bandes de leur utilisation actuelle prend du temps, en plus d'être coûteux. En outre, ces nouvelles fréquences sont également susceptibles de rester fragmentées, et pourraient nécessiter des techniques de transmission avancées [3]. L'agrégation de fragments potentiellement non contigus de bandes passantes, sur des bandes de fréquences disparates soulève une série de défis pour la conception d'antennes et d'émetteurs-récepteurs RF, qui doivent être surmontés afin de prendre en charge l'agrégation spectrale.

La densification des réseaux est réalisée en augmentant le nombre d'antennes par nœud (appareil utilisateur et station de base) et en complétant le réseau (macro-cellules) avec des nœuds sous-jacents hétérogènes de faible puissance (LPN), tels que les stations de base micro, pico et femto, augmentant ainsi la densité de celles-ci, dans les zones de couverture du réseau (macro) traditionnel [4]. Dans de tels déploiements de réseaux hétérogènes (HetNets), les macro-cellules fournissent un parapluie de couverture étendue tandis que les LPNs sont déployés de manière plus ciblée pour atténuer les zones mortes et, plus important encore, soulager les zones de trafic chaudes [5]. Un déploiement dense, de nœuds d'infrastructure, peut potentiellement réduire la charge et améliorer la puissance de signal souhaitée, en raison des liaisons radio plus courtes. Les cellules plus petites fournissent des débits de données plus élevés et nécessitent moins d'énergie pour les transmissions en liaison montante (limitation de puissance). Cela entraîne des dépenses d'investissement (CAPEX) et des dépenses opérationnelles (OPEX) bien inférieures par rapport aux macro-cellules. Cependant, l'introduction de plus de stations-service pour combler le déficit de capacité entraîne une complexité supplémentaire en raison du besoin de techniques adaptées pour lutter contre le brouillage omniprésent. Le partage de la même fréquence porteuse, par exemple, entre des macro-cellules et de petites cellules peut entraîner de graves interférences sur la liaison montante au niveau des petites cellules. Plus important encore, la transmission, de puissance élevée, des macro-cellules peut réduire considérablement la couverture des petites cellules, conduisant à une sous-utilisation flagrante des nœuds de faible puissance.

Des stratégies efficaces de gestion du spectre sont la troisième option possible pour l'expansion de la capacité sans fil. Le spectre, est une ressource naturelle dont la gestion est confiée à des organismes de régulation au niveau national et international, qui le gèrent selon trois catégories de régimes d'autorisation (ou licence) à savoir : *A) autorisation individuelle, B) licence souple, C) autorisation générale*. Le premier régime d'autorisation, est identifié comme l'un des facteurs qui ont le plus contribué à la rareté du spectre que connaît actuellement le domaine. Cela provient du fait que dans ce type d'autorisation, le droit d'accès (ou licence) à une part (ou des parts) particulière(s) du spectre est accordé sur une base exclusive. Or, il est bien admis que d'une part, le spectre alloué à tous les réseaux sans fil est sous-utilisé à la fois spatialement et temporellement, et que d'autre part les fluctuations du trafic dans ces réseaux sont majoritairement asymétriques (l'utilisation du spectre dans un bloc de bande de fréquence radio varie de 15% à 85% à différents endroits à un instant donné [6]. Ces deux faits, sont à l'origine de situations paradoxales dans lesquelles des réseaux sans fil à cours de ressources spectrales (à certains moments) subissent une dégradation de performances bien qu'ils se trouvent dans une zone où une relative abondance de ces ressources existe, mais cloisonnées d'autres réseaux sans fil couvrant cette même zone. Dans les milieux urbains denses, de nombreux

réseaux hétérogènes dotés de technologies d'accès radio (RAT) différentes vont vraisemblablement se chevaucher. Ce n'est dans l'intérêt ni des utilisateurs ni des propriétaires de réseaux mobiles (ORMs) que ce cloisonnement des ressources persiste.

Ouvrir toute cette capacité et utiliser le spectre environnant de manière efficace et rentable, en le rendant disponible d'un seul coup aux utilisateurs, est au cœur d'énormes efforts de recherche actuels. Mais, s'il y a une approche qui a reçu le plus d'attention c'est bien celle basée sur la radio cognitive (RC). Une RC est "un système de communication sans fil intelligent capable de changer les paramètres de son émetteur/récepteur sur la base de son interaction avec l'environnement externe dans lequel il opère ". Un réseau radio cognitive (RRC) est un réseau constitué de nœuds RCs. Un système RC pourrait donc constituer la solution à notre problème, puisqu'il serait capable de détecter quand un canal d'un spectre donné est libre, et l'utiliser pour ses propres communications ; et dès qu'il détecte la présence d'utilisateur titulaire (utilisateur primaire UP) du canal de libérer celui-ci. Ainsi, l'UP continue d'utiliser ses ressources sans s'apercevoir qu'il y a un utilisateur non titulaire (utilisateur secondaire US) qui partage, avec lui, ces mêmes ressources.

Cette approche a plusieurs applications concrètes (en plus de celles potentielles) ; par exemple dans [7] un état de l'art est présenté sur l'utilisation de la RC pour l'intégration de technologies d'information et de communication dans les grilles intelligentes (GIs) pour surveiller et réguler la production et l'utilisation de l'électricité. Dans [8], il est montré comment la RC pourrait être utilisée pour améliorer l'efficacité énergétique dans les réseaux verts.

Pour acquérir un comportement d'un CR, un certain nombre de fonctions cognitives doivent être implémentées ; elles sont exécutées dans ce qu'on appelle un cycle cognitif [9] ; il s'agit du *captage de spectre (spectrum sensing)*, de l'*analyse du spectre (spectrum analysis)*, de l'*assignement du spectre (spectrum decision ou spectrum assignment)*, du *partage de spectre (spectrum sharing)*, et de la *mobilité du spectre (spectrum mobility)*.

*Le captage de spectre (spectrum sensing) CS* : C'est une fonction fondamentale de tout composant CR, qui consiste à surveiller une bande de fréquence donnée à la recherche d'un trou spectral, c.à.d. une partie de cette bande dans laquelle aucune activité d'aucun UP n'est détectée. Si la définition de cette fonction de base est simple, sa concrétisation par une implémentation réelle n'est pas une chose aisée. En effet, il y a plusieurs techniques de captage de spectre proposées, mais aucune n'a pu faire l'unanimité et encore moins avoir le statut de standard. Les techniques proposées, à cet effet, ont des exigences différentes et sont de complexités variées. Il y a des techniques simples mais dont les performances sont incertaines, comme il y en a d'autres dont les performances sont assez bonnes mais

qui exigent la connaissance préalable des caractéristiques des signaux à détecter. Une autre question, importante, qui se pose ensuite, est celle de savoir comment un CR doit-il organiser ses comportements de transmissions avec ceux du captage ; doivent-ils se dérouler tour à tour, en parallèle, ou être déclenchés par évènement ? En plus de cette question, il y a aussi celle de savoir comment capter une large bande avec des techniques adaptées à des bandes étroites ; doit on procéder de manière séquentielle, aléatoire, ou avec un ordre préétabli (et dans ce dernier cas comment ?). Chacune des trois manières, de faire le captage, posent des questions qui lui sont propres. Avec la première manière, c'est la latence, inhérente au passage d'une sous-bande à la suivante (et donc à celle du captage de toute la bande), qui doit être analysée, par exemple. La deuxième, entraîne un risque de dégradation des performances si, par exemple, les sous-bandes qui se trouvent choisie pour le captage sont souvent celles utilisées par les UPs, bien qu'il puisse y avoir aux mêmes moments des sous-bandes libres, ailleurs. Si on opte pour la troisième manière, on devra disposer d'informations supplémentaires, liées au contexte ou générées d'après un modèle quelconque, qui guident le captage [10]. Au-delà des questions précédentes, il y celle du choix du CR responsable du captage ; est-ce que cette tâche est affectée aux SBs cognitives (SBCs), aux USs, ou est-elle partagée entre la SB et les USs qui lui sont rattachés ?

*L'analyse, l'assignement, et le partage de spectre* : est la fonction qui, respectivement, détermine les caractéristiques des trous spectraux détectés lors du CS, affecte les meilleurs trous spectraux selon un critère choisis, et partage le spectre disponible entre les différents USs. Donc, ces fonctions ont un rapport avec le traitement des résultats du CS et, à ce titre, interpellent pour savoir qui décide des bandes à capter et comment, surtout dans un environnement de réseaux sans fil hétérogènes (RSFHs). Bien entendu, la connaissance, plus ou moins détaillée, du contexte (de l'environnement) est nécessaire à la prise de cette décision. Pour organiser l'acquisition de cette connaissance, dans un système RC, il faut déterminer la source des données de base, le responsable du traitement de ses données, comment ces données sont-elles acheminées, et comment sont-elles exploitées. Concernant l'acheminement des données liées au contexte, et des messages de contrôle relatifs aux fonctions de base d'un RC, des propositions ont été faites comme l'utilisation d'un canal de contrôle cognitif (CCC) [11] [12], on a aussi proposé le recours à des canaux pilotes cognitifs [13] [14] ; cependant son implémentation pose problème, vue que le spectre disponible à chaque instant, dans un système sans fil RC, est de nature dynamique, et peu prévisible. Il est clair que dans un environnement de RSFHs le problème est amplifié, bien qu'il présente aussi plus d'opportunités. Nous touchons là, un aspect des RRCs, en rapport direct avec la façon dont un système RC informe le réseau des résultats de son captage, et permet au réseau de partager le spectre disponible collecté, en retour. On comprend, alors, pourquoi les solutions qui sont adoptées pour cet aspect déterminent, dans large mesure, les performances attendues des RRCs.

La *mobilité du spectre* MS : Dès qu'une fréquence de fonctionnement appropriée a été choisie, la communication peut être lancée, mais en raison de la grande dynamique de l'environnement mobile, la bande sélectionnée peut être réoccupée par une UP au bout d'un certain temps. Une caractéristique fondamentale de la technologie RC est l'obligation de changer de bande de fonctionnement lorsque le signal d'une transmission primaire est détecté au niveau du récepteur. Cette fonction est appelée *mobilité du spectre*. Les questions qui se posent à ce sujet sont de savoir qui décide de la bande de fréquence de destination (et comment), est-ce que l'opération de transfert se fait avec une latence acceptable, et comment les RCs concernés sont informés de l'évènement et de son issue possible.

Nous avons passé en revue un échantillon de propositions représentatives des réponses apportées à la crise de la rareté du spectre qui, rappelons-le, met en cause le régime des autorisations individuelles (ou des licences). Ces réponses peuvent être regroupées en trois classes, à savoir celles qui préconisent l'exploitation du spectre exempt-de-licence, celle qui préfèrent la refonte du spectre sous-licence, enfin celles qui essayent de réconcilier les deux précédentes en défendant l'exploitation conjointe des deux types de spectre. Commençons par rappeler que l'utilisation d'un spectre sous-licence a deux avantages significatifs : une plus grande fiabilité et des performances meilleures. Cela est en partie dû à la prédictibilité en termes de la bande de fréquences opérationnelle et des ressources radio disponibles à chaque instant ; ajouté à cela, l'utilisation de la technologie de transmission adéquate et l'entière responsabilité du spectre alloué.

Exempter de licence l'exploitation du spectre est encouragée par le concept de la radio cognitive qui conçoit un univers idéal où des équipements sont capables de scruter l'environnement radio à la recherche de vides spectraux pour supporter les communications sans fil, en adaptant leurs configurations internes en conséquence. Dans les faits, les choses sont plus compliquées pour diverses raisons, dont l'absence de technique générique efficace pour détecter les vides spectraux (spectrum sensing), la nécessité d'organiser les périodes de détection du spectre avec celles des communications effectives, l'obligation de rendre au fait l'ensemble des intervenants dans un réseau de l'état de disponibilité des ressources à tout instant, le choix des bandes de fréquence prometteuses à scruter, et surtout le souci des autres systèmes qui utilisent le même spectre. Ce dernier point pose le problème épineux de la coexistence entre le grand nombre d'utilisateurs potentiels du spectre exempt-de-licence. Tous ces facteurs réunis, introduisent une grande incertitude en termes de disponibilité du spectre voulu, en temps voulu, menant à des performances et une QoS très fluctuantes.

Pour ce qui est de la refonte du spectre avec-licence, l'idée est de n'accorder que ce qui est juste nécessaire ; cela suppose que chaque réseau verra le spectre qui lui alloué fluctuer au gré de la

demande. Techniquement, deux problèmes majeurs pourraient se poser, l'un a trait à la disparité des bandes de fréquences allouées à un instant donné, l'autre à la difficulté d'effectuer un ordonnancement optimal des utilisateurs. Le premier point fait référence au fait que chaque portion de spectre à ses propres caractéristiques et propriétés liées à la propagation des signaux, au degré de leurs atténuations, aux interférences subies, etc. ; le deuxième point est lié à l'allocation des ressources qui assurent la meilleure QoS. Un autre aspect qui risque de poser problème, est la manière d'organiser cette refonte, sachant qu'aussi bien la constitution de pool de ressources que la gestion et le contrôle des opérations des locations de spectre introduisent leurs propre lot de difficultés.

L'utilisation conjointe des deux types de spectre dans les conditions sus-présentées va, en plus de l'héritage des désavantages combinés des deux approches précédentes, nécessiter une intégration assez compliquées, coûteuse en infrastructure, et limitée dans la prise en charge de toute l'hétérogénéité des technologies d'accès existantes.

Bien sûr, nous ne pouvons ignorer ni les avantages ni les justifications techniques derrière les approches que nous venons de présenter. Elles arrivent, en effet, à répondre d'une manière ou d'une autre aux problèmes qu'elles se sont posé. De notre point de vue, ce ne sont pas les solutions techniques proposées, mais bien les directions prises qui nous paraissent en décalage par rapport à l'origine de la crise du spectre. Le point de départ était, d'une part, que le spectre est une ressource naturelle rare et, d'autre part, que la détention par les ORMs de droits d'utilisation exclusifs de certaines bandes de spectre entraînait une sous-utilisation de celui-ci. Or, l'examen des solutions adoptées pour l'exploitation du spectre exempt-de-licence montre qu'il faut un spectre abondant pour leur faisabilité, alors que pour l'exploitation du spectre avec-licence leur faisabilité entraîne un spectre sous-utilisé. En effet, le spectre exempt-de-licence risque d'être victime de son propre succès puisque d'un côté il est libre d'accès attirant vers lui un très grand nombre d'utilisateurs, mais d'un autre côté cet afflux des utilisateurs va réduire la marge de manœuvre de chacun d'eux ; ceci est d'autant plus vrai que le spectre est moins abondant. En général, on estime que ce risque est surmontable puisque le spectre exempt-de-licence est supposé assez important, permettant à chacun de trouver une issue, en définitive. Donc, les techniques de coexistence supposent implicitement qu'il y a assez de spectre. Pour le spectre avec-licence, la mise en commun du spectre ou la possibilité d'établir des contrats permettant aux plus nantis (du moment) de servir les moins pourvus suppose une quantité globale plus que suffisante aux besoins de l'ensemble des utilisateurs pendant les moments de fortes montées en charge. Ceci implique que durant les périodes où la demande est moins pressante il y aura du spectre oisif, c.à.d. une sous-utilisation de celui-ci si on considère qu'il y a toujours une demande hors des réseaux liés qui ne pourra pas être satisfaite malgré la disponibilité du spectre. Ceci pourrait s'appliquer aussi au spectre exempt-de-licence puisque le manque de

coordination entre les divers intervenants pourrait résulter en des parties du spectre où la charge est forte alors qu'elle l'est moins dans d'autres.

De ce qui précède, nous en concluons que la sortie de la crise, attribuée à l'exploitation du spectre selon le régime des autorisations individuelles conventionnel, n'est pas nécessairement dans l'abandon de ce régime vers celui du spectre exempt-de-licence ou vers son exploitation par sa mise en commun ou en le rendant inter-échangeable entre plusieurs parties contractuelles. Ce régime pourrait être revisité, en le débarrassant de son défaut tout en maintenant ses avantages.

Une première difficulté qu'il faut surmonter, dans le cas des RSFHs, est celle de l'hétérogénéité des trous spectraux (que nous appelons opportunités de spectre radio OSRs). En effet, ce qui caractérise complètement les OSRs s'avère dépendre de la technologie d'accès réseau (TAR) particulière du réseau dans lequel ces OSRs se produisent. Une analyse des cinq TARs, les plus largement utilisées dans les réseaux sans fils traditionnels (TDMA, CDMA, CSMA/CA, OFDMA, et SC-OFDMA), est nécessaire pour identifier, dans chaque cas, ce qui est essentiel pour déterminer complètement les OSRs correspondantes. Dans une première étape, Il faut chercher si la caractérisation des OSRs hétérogènes peut être réduite au strict nécessaire, et essayer de mettre à contribution les informations relatives au contexte de chaque réseau sans fil individuel. Enfin, il faut se poser les questions relatives à la *nature* des OSRs (c.à.d. ce qui peut être considéré comme telles), la prédictibilité de leurs *durées*, et au *motif général* selon lequel elles se produisent (dans une bande de spectre particulière). Dans une deuxième étape, il faut impérativement uniformiser l'univers des diverses OSRs mentionnées ci-dessus. La clé de cette uniformisation du spectre réside, de notre point de vue, dans le choix d'une TAR adéquate capable de supporter des schémas génériques à même d'opérer, de manière efficace, dans des environnements tels que les RSFHs. En d'autres termes, la technologie candidate devrait posséder les ingrédients nécessaires au contrôle des trois dimensions des OSRs à savoir, le temps, la fréquence, et la puissance. L'avantage que nous pourrions tirer de l'adoption d'une TAR unique est triple : i) les communications en mode secondaire sont effectuées dans une seule TAR, ii) toutes les OSRs (dans ce même mode) sont traitées de manière uniforme, malgré leur hétérogénéité, iii) économie en termes d'interfaces réseaux sans-fil.

Le choix d'une architecture appropriée, est l'élément central dont il faut avoir le souci. Sur le plan conceptuel, il faut considérer une architecture qui supporte la coopération (à divers niveaux) et qui confère au réseau la flexibilité, l'adaptabilité, et l'agilité nécessaires. Sur un plan méthodologique, on doit être prudent dans le choix de la finesse des détails, et du degré d'optimisation.

Deux questions importantes se posent quant à la réactivité qui doit caractériser la solution proposée, et à la constitution matérielle des acteurs intervenants. La première question, appelle à rapprocher les

centres de décision résidants dans le réseau cœur des limites du réseau d'accès sans fil pour éviter une latence trop importante. La deuxième question, attire l'attention sur l'effet de levier que peut avoir une richesse en interfaces-réseaux sans fil sur les capacités des équipements du réseau. Un choix judicieux, permettrait à ces acteurs de gagner en agilité et de pouvoir communiquer et scruter l'environnement en même temps. Ce serait très intéressant s'ils pouvaient avoir la flexibilité nécessaire, pour communiquer sur deux bandes différentes simultanément, s'adapter aux conditions du réseau, et engager une coopération dès que le besoin se fait sentir. Une attention particulière doit être prêtée à la distribution des rôles entre les différents acteurs de l'architecture, lors de l'implémentation des différentes fonctions de base du réseau. Une approche équilibrée, qui évite aussi bien la centralisation forte que la distribution poussée, est à privilégier pour tirer profit leurs avantages et atténuer leurs inconvénients.

La coopération au sein des systèmes RCs est connue pour être un levier pour booster les performances. Il donc essentiel que les solutions proposées supportent cette coopération ; de préférence en option, pour tenir compte de l'évolution de l'environnement qui parfois nécessite la coopération et parfois non. Vu que les mécanismes de coopération nécessitent des interactions supplémentaires qui peuvent être coûteuses, il faut s'assurer que ces mécanismes ne soient déclenchés que lorsque leur apport vaut leur coût (qui doit être abaissé tant que faire se peut). Si ce coût peut être plafonné, ou mieux être constant, les conséquences sur la prédictibilité des événements, l'évaluation des performances, et la synchronisation entre les actions impliqués seront bénéfiques. Cette remarque est aussi valable pour ces mécanismes en l'absence de coopération.

L'hétérogénéité des RSFHs, tant au niveau des TARs que des OSRs, appelle des mécanismes qui soient génériques, agile, flexibles, et adaptables. La généricité, permet d'atténuer l'effet de cette hétérogénéité ou, mieux encore, de la rendre transparente. L'agilité est très demandée dans les systèmes RCs, pour suivre le rythme des fluctuations des ressources disponibles dues à l'activité imprévisibles des utilisateurs primaires, prioritaires. Elle participe, aussi, à augmenter le pourcentage utile d'exploitations des OSRs, en diminuant le pourcentage d'exploitation des ressources par les fonctions de base du système RC. La flexibilité permet de changer de situation de fonctionnement de manière souple. Enfin, l'adaptabilité donne la capacité à incorporer de nouvelles fonctionnalités sans bouleverser la conception existante.

Dans cette thèse, nous proposons une architecture conceptuelle minimaliste d'un réseau cellulaire d'inspiration radio-cognitive pour l'intégration de réseaux sans-fil hétérogènes (RSFHs), désormais

appelé I-CRICNet, ainsi que les schémas protocolaires qui y sont mis à l'œuvre. L'ultime quintuple but de cette intégration est de :

1. Rendre possible l'exploitation commune, via I-CRICNet, du spectre temporairement inutilisé (dans les réseaux sans fil intégrés) sans modifications significatives des infrastructures et protocoles de ces réseaux
2. Laisser à ces réseaux le plein contrôle sur leurs spectres (sous licence) respectifs
3. Permettre à I-CRICNet d'exploiter de manière opportuniste tout le spectre ainsi laissé à sa disposition
4. Offrir les moyens de coopération en cas de nécessité
5. Permettre à tous les utilisateurs de passer de leurs réseaux sans fil vers I-CRICNet et vice versa, de manière transparente.

Pour atteindre pleinement ces objectifs, dans un environnement aussi hétérogène, notre démarche consiste à préciser deux aspects liés, respectivement, aux questions-clés de la problématique posée et au choix des principes de conception à adopter. Pour le premier aspect, on doit décider comment : i) collecter et partager le spectre, ii) être au fait du contexte, iii) assurer la mobilité du spectre vi) assurer la coopération et la coexistence, v) choisir l'infrastructure de réseau sous-jacente. Chemin faisant, la conception des différents composants de l'architecture, en réponse à ces questions, devait être menée sans perdre de vue leur intégration à l'architecture globale, pour créer la synergie nécessaire entre ces composants. Le deuxième aspect, est celui de la flexibilité, l'adaptabilité, et l'agilité.

Cette thèse est structurée en quatre chapitres. Le premier chapitre passe en revue divers standards, architectures, techniques, et paradigmes qui reflètent différentes approches pour la gestion du spectre et constituent autant de manières d'exploiter le spectre pour augmenter la capacité et la couverture des réseaux sans fil mobiles. Ce passage en revue, nous permettra de juger du bien-fondé des divers axes suivis en direction de l'abandon du régime des autorisations individuelles classique. Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter nos choix de conception architecturale et protocolaire sous-tendant la mise en œuvre des fonctions de collecte et de libération des OSRs au sein d'I-CRICNet, de mobilité du spectre, et de partage de celui-ci. A cet effet, nous traiterons successivement de l'hétérogénéité des OSRs et leur uniformisation, des différents composants (acteurs) de l'architecture ainsi que leurs rôles respectifs, des divers scénarios d'intervention de cette architecture, de la migration du spectre, de la mise en œuvre globale des fonctions de collecte et de libération des OSRs, et des protocoles sous-tendant cette mise en œuvre dans divers scénarios de fonctionnement. Le troisième chapitre est consacré à une question clé de l'étude de faisabilité de certaines des propositions exposées dans le chapitre précédent. Nous y présentons un schéma de

captage/surveillance de spectre (spectrum sensing/monitoring) qui constitue le fondement des communications opportunistes dans I-CRICNet, nous y adjoignons la prise en charge de la coopération et le mettons à nouveau à l'épreuve d'un certain nombre de scénarios de fonctionnement. Le but étant de vérifier l'agilité de l'architecture proposée ainsi que la généricité du schéma proposé. Dans le quatrième chapitre nous nous penchons sur l'analyse et l'évaluation des performances des schémas de détection détaillés aux chapitres 2 et 3. Le chapitre est constitué de deux parties ; la première présente les résultats des simulations relatives au schéma de détection des OSRs du chapitre 2. Dans la deuxième partie, nous proposons, aussi, une étude analytique du phénomène d'interférences co-canal. En effet, il est vrai que dans les réseaux radio-cognitive (en fait dans leur version "overlay") les USs communiquent dans les canaux non occupés par les UPs et, par conséquent, ne devraient pas causer d'interférences Co-canal. Il y a, cependant, des situations où ce phénomène est inévitable, par nature, comme dans les versions "underlay" et "interwave" [15]. Dans ces deux derniers cas de figure, des dispositions devraient être prises pour ne pas causer d'interférence induite, aux UPs, ou du moins de la maintenir à un niveau acceptable. Dans ce même chapitre, nous traitons cet aspect dans le cadre du réseau I-CRICNet, sous l'angle de l'analyse des interférences (au niveau d'une SBP donnée) causées dans les canaux utilisés pour les communications opportunistes. En fin, cette thèse sera clôturée par une conclusion.

---

# *CHAPITRE 1*

## *APPROCHES POUR L'EXPLOITATION DU SPECTRE*

---

Les opérateurs de réseaux mobiles (ORMs), sont en quête permanente de solutions économiques et efficaces pour élargir leurs zones de couverture et augmenter leurs capacités, dans le but d'améliorer la qualité de service (QoS) et/ou d'expérience (QoE) fournies à leurs utilisateurs et d'assurer une couverture en tout lieu. Dans leur quête, les ORMs disposent de trois degrés de liberté et sont contraints par trois réalités. Les degrés de liberté sont le spectre, l'infrastructure, et le partage ; alors que les réalités sont la rareté du spectre, les coûts associés au déploiement des infrastructures, et l'hétérogénéité des réseaux. Lorsque les gains réalisés, à travers l'amélioration de l'exploitation du spectre alloué et/ou des investissements en infrastructure consentis, tombent à des niveaux jugés très bas, les ORMs sont en général plus enclins (ou obligés) à envisager le recours au partage de ces facteurs. Ce partage pourrait se faire à des niveaux différents et impliquer des partenaires de manière séparée ou globale. La tentation est grande, pour les ORMs, de constituer un réseau sans fil hétérogène qui rende transparente la diversité des TARs, des bandes de spectre, des protocoles, des infrastructures, ...etc, et qui préserve l'autonomie de chaque réseau individuel.

La littérature aussi bien que les standards abondent en propositions, aussi ingénieuses les unes que les autres, retraçant le cheminement des efforts déployés (aussi bien par chaque ORM individuel que par des ensembles d'ORMs) pour identifier les défis, guider les choix de conception, et proposer des architectures adéquates. Cette littérature recèle autant d'éléments de réponse à la problématique de la constitution de réseaux sans fil hétérogènes. Cependant, leur présentation dans les détails ou selon les divers aspects est chose ardue, vu la diversité des paradigmes, architectures, et techniques proposés. Nous pensons que le fil conducteur des solutions proposées en termes d'infrastructures, de protocoles

de communication, de gestion des ressources radio, et de partage d'accès, réside dans la question relative au choix de la manière d'exploiter le spectre radio en tant que ressource naturelle indispensable (et surtout limitée) au fonctionnement des réseaux sans fil.

Par conséquent, notre présentation va se focaliser sur les approches proposées quant à la manière d'aborder l'exploitation du spectre radio, sous la pression de la demande toujours croissante en QoS/QoE.

## 1.1 Les types de régimes de licences

Le spectre en tant que ressource naturelle est géré au niveau national et international par des organismes de régulation qui l'attribuent selon des régimes de licence, qui peuvent être divisés en trois catégories principales [6] :

### *A) Autorisation Individuelle (Individual Authorisation)*

Dans ce type d'autorisation, le droit d'accès (ou licence) à une part particulière (ou des parts) du spectre est accordé sur une base exclusive. Seul le détenteur de la licence est autorisé à exploiter les bandes dans le temps, fréquence, et région géographique. Les bandes de fréquences allouées sous ce régime de licence sont appelées *bandes sous-licence (licensed bands)*. Dans chaque pays il y a une autorité nationale de régulation (ANR) qui délivre ces licences.

### *B) Licence Souple (Light Licensing)*

Ce type de licence initie un cadre de régulation plus flexible et simplifié, comparé à l'autorisation complètement exclusive. Cette méthode d'accès est destinée à être appliquée aux bandes de fréquences où le risque d'interférence est bas. Cependant, pour maintenir un certain niveau de protection, il est optimal d'éviter les interférences aux utilisateurs déjà existants.

### *C) Autorisation Générale (General Authorisation)*

Le terme d'*accès exempt-de-licence (unlicensed)* est utilisé pour ce type de régime où l'ensemble des utilisateurs (et leurs fournisseurs de services correspondants) peuvent coexister et sont capables d'utiliser les bandes de fréquences spécifiques de manière opportuniste et avec des droits de priorités d'accès égaux. Les bandes rendues disponibles sous ce régime comprennent les bandes étroites sous-licence appelées TVWSs (TV White Spaces), les bandes Wi-Fi dans 5GHz, etc.

Dans le but d'améliorer, le plus possible, l'utilisation du spectre *sous licence*, diverses technologies de multiplexage, telles que FDMA (Frequency Division Multiple Access), TDMA (Time Division

Multiple Access), CDMA (Code Division Multiple Access), et des techniques MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) ont été utilisées, pour supporter plus d'utilisateurs avec ces ressources limitées. Malheureusement, elles n'y sont pas arrivées à cause de la rareté du spectre occasionnée par le régime des allocations fixes.

Le régime des autorisations individuelles (accès sous licence) est mis en cause dans l'aggravation de la rareté du spectre, dont souffrent les réseaux de communications sans-fil contemporains. On lui reproche de créer un cloisonnement spectral conduisant à la sous-utilisation des bandes sous licence. Ce qu'il faut entendre par là, c'est les situations, constamment rencontrées, dans lesquelles des réseaux sans fil à court de ressources spectrales sont empêchées d'utiliser les ressources, momentanément ou spatialement, non utilisées d'autres réseaux couvrants la même zone. Partant de ce constat, les efforts se sont orientés (et continuent de l'être) vers la recherche d'une issue à cette situation.

## 1.2 Restructuration de Spectre

Tout d'abord, le premier réflexe fut d'essayer d'augmenter le spectre utilisable par la recherche de nouvelles bandes, ayant les caractéristiques de propagations souhaitées. Pour cela, on s'est tourné vers des plages de fréquences particulières (100MHz-6GHz), occupées par un large éventail d'utilisateurs non-mobiles (de ce spectre), ex., militaire, radar, diffusion TV, médical, etc. Bien que les systèmes cellulaires soient capables d'opérer dans ces bandes, celles-ci sont déjà fragmentées et affectées aux exploitants sus mentionnés, de manière exclusive, par les organismes régulateurs [6]. Dans le même esprit, on a aussi pensé à la migration de systèmes de communication non-mobiles de leurs spectres actuels vers des bandes de fréquences alternatives. Cependant, cette opération n'est pas toujours une solution faisable puisqu'elle implique une procédure de long terme et génère un coût additionnel.

## 1.3 Densification des réseaux

Les réseaux cellulaires de communications sans fil mobiles conventionnels (à stations de base homogènes) Figure.1(a) ont évolués vers des réseaux hétérogènes par le déploiement de diverse classes de nœuds de basse puissance (NBPs) de transmission, dans les zones de couverture des stations de base conventionnelles (macroSBs), Figure.1(b). Ces réseaux ont été standardisés notamment dans le cadre du " Long Term Evolution(LTE)-Advanced standard development". Il y a plusieurs types de NBPs dont les micros stations de base (souvent appelées eNodeBs, ou eNBs), pico eNBs, femtocellules (eNBs maison), relais et les systèmes d'antennes distribuées (SAD, aussi appelés

têtes radio éloignées ou TREs). Le déploiement de ces NBP augmente la capacité de ces réseaux grâce à la réutilisation spatiale des ressources-radio (des SBs) dans les nouvelles zones de couverture créées par ces nœuds de transmission [16]. En fait, alors que les macro-cellules du réseau constituent la base pour la mobilité et la couverture, les NBPs déployés à l'intérieur de celles-ci vont prendre en charge la demande du trafic croissant. Bien que l'introduction de ces nouveaux types de SBs permette d'augmenter la capacité, elle peut aussi augmenter le niveau des interférences Co-canal (ICC) ; ce qui nécessite des techniques adéquates pour les atténuer. A cet effet, des schémas sont adoptés, dans le système LTE-Advanced, sous la dénomination de ICIC (Inter-Cell Interference Coordination), eICIC (enhanced ICIC), et CoMP (Coordinated Multipoint Transmission). Ces schémas, tentent d'empêcher des scénarios indésirables de se produire, tels que celui où des nœuds adjacents allouent les mêmes ressources (temporelles ou fréquentielles), avec la pleine puissance de radiation, aux équipements utilisateurs (EUs) situés près des limites de couverture.

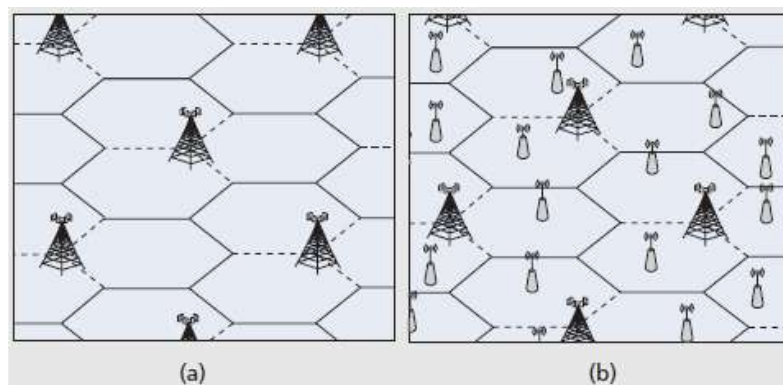


Figure 1 a) Réseau homogène b) Réseau hétérogène

Pour les schémas ICIC et eICIC, la coordination est effectuée par l'échange de message de coordination entre les SBs via une interface nommée X2 ; le but est de fournir à l'ordonnanceur, sur une SB donnée, l'information sur la situation courante ou prospective des interférences dans les SBs voisines.

Avec ces schémas, les délais avec lesquels les messages de coordination peuvent être échangés dépendent de la technologie utilisée pour supporter X2 ; cette latence n'est pas garantie d'être courte. L'idée principale derrière l'approche CoMP est d'amener les SBs voisines à encoder (DL) et décoder (UL), de manière coopérative, des messages pour des utilisateurs multiples et simultanés, obtenant ainsi un gain de multiplexage par rapport à leur traitement comme des interférences [17]. Les schémas CoMP visent une coordination dynamique, et à ce titre peuvent exiger des latences plus courtes. Ces schémas se déclinent en trois classes à savoir : 1) Ordonnancement-Coordonné et Formation-de-Faisceaux-Coordonnée (OC/FSC), Transmission-Concertée TC, et la Sélection-de-Point-de-Transmission SPT [18]. L'idée du FSC s'adresse au problème du niveau du SINR, en calculant les niveaux de puissances et les coefficients des faisceaux formés pour atteindre des SINRs communs ou

de maximiser le SINR minimum. Dans le schéma OC, on divise le réseau en clusters et on applique un ordonnancement centralisé dans chacun des clusters dans le but de déterminer, dans chaque lapse de temps, quels points de transmission d'un cluster doivent émettre et vers quel équipement utilisateur. La seule information que les multiples points de transmission (PTs) se partagent est l'IEC (Information sur l'Etat du Canal) pour multiples EU, alors que les paquets de données qui ont besoin d'être convoyés à un EU sont disponibles sur un seul PT. Dans le schéma JT, la même transmission de données est effectuée par multiples PTs coordonnés, avec des poids appropriés des faisceaux formés. Le schéma TPS, peut être vu comme un cas particulier de JT, où la transmission des données destinées à un EU est effectuée par un seul PT, alors que les données sont disponibles chez tous les autres.

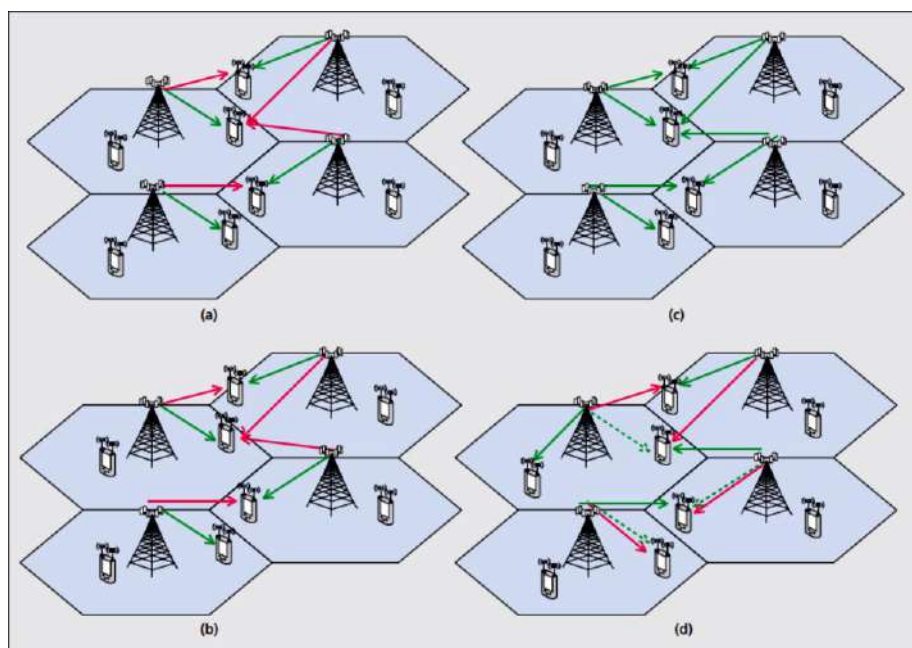


Figure 2 Classification Générale des Techniques CoMP : a) OC b) FSC c) JT d) SPT

La Figure.2 illustre les principes de CoMP OC/FSC, TC et SPT. OC/FSC, réduit le niveau d'interférence subi par un EU terminal en sélectionnant de manière appropriée les poids de formation de faisceaux des points d'interférence pour diriger l'interférence vers l'espace nul de l'UE concerné, comme représenté par la flèche rouge en pointillé. JT permet à un ou plusieurs points voisins de transmettre le signal souhaité plutôt que les signaux d'interférence du point de vue de l'EU sélectionné. TPS permet à l'EU d'être ordonnancé dynamiquement par le TP le plus approprié en exploitant les changements dans les conditions d'évanouissement du canal. Une flèche verte en pointillé fait référence à une cellule interférente qui pourrait transmettre potentiellement les signaux souhaités à l'EU dans les délais ultérieurs.

Dans un système OFDMA, une cellule peut assigner à ses utilisateurs situés à ses bords des blocs temps-fréquence différents de ceux des utilisateurs des cellules adjacentes ou des utilisateurs internes

de n'importe quelle cellule [17]. Cette approche robuste est appelée FFR (Fractional Frequency Reuse), qui se décline sous deux formes, FFR-strict et FFR-soft [5]. Le principe est illustré sur la

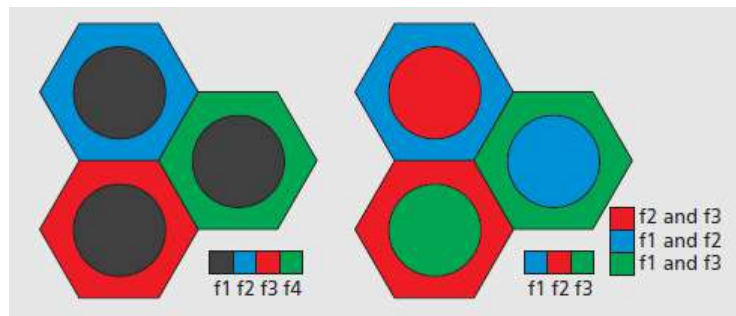


Figure 3 Réutilisation Fractionnée des Fréquences

Figure.3 en utilisant trois cellules adjacentes et 3-4 bandes de fréquences qui ne se recouvrent pas. L'idée de base de FFR-strict est de créer des partitions entre les utilisateurs aux bords et les utilisateurs internes sur la base du SNR, réutiliser les blocs de ressources (BRs) des utilisateurs internes dans chaque cellule et allouer aux utilisateurs de bords des BRs orthogonaux, ce qui élimine les interférences entre cellules adjacentes. Dans le cas de la FFR-soft, la réutilisation des BRs par cellule est augmentée, en réutilisant tous les BRs dans chaque cellule mais avec une puissance de transmission plus élevée accordée aux utilisateurs de bords pour atténuer les interférences accrues entre/cross tiers.

Dans [4], il est souligné que même avec placement optimal des petites cellules, elles peuvent être sous utilisées à cause des changements de demandes de trafics, avec le temps. Une solution à ce problème est donnée par l'expansion de la couverture d'une cellule. Cette solution consiste à biaiser le limites du handover en faveur des petites cellules, qui retiennent plus les utilisateurs qui leurs sont proches. La coordination dans ces réseaux denses est primordiale pour combattre les interférences omniprésentes dans ces environnements. Par exemple, une technique dénommée "Reactive Carrier Domain ICIC" est proposée pour orchestrer une bonne utilisation des ressources afin d'assurer un débit minimum à tous les utilisateurs. Si une cellule qui sert un utilisateur victime n'exploite pas toutes ses ressources, elle peut choisir de mettre à contribution plus de ressources pour augmenter la largeur de bande disponible. Elle peut aussi choisir de demander aux petites cellules interférentes d'arrêter d'utiliser certaines ressources pour réduire les interférences subies par l'utilisateur victime [19]. Un mécanisme d'acheminement coopératif dans les réseaux sans fil par échange de bandes est proposé dans [20] ; l'idée de base est de motiver l'acheminement par une compensation sous forme de bande passante (au lieu de puissance), surtout lorsque la bande passante disponible pour chaque nœud est rare. Dans ce genre de coopération, la source délègue autant de fréquences de sa bande passante que possible à l'acheminement en échange d'une coopération qui garantisse le débit minimum requis, à la source. Ainsi, dans la Figure.4, lorsque le nœud  $j$  achemine pour le nœud  $i$  à travers l'échange de

bande passante, le nœud  $i$  peut retenir  $W_i - \Delta W_{ij}$  et déléguer  $\Delta W_{ij}$  au nœud  $j$ . Celui-ci, utilise alors le reste de la capacité réalisée avec la bande passante augmentée  $W_j + \Delta W_{ij}$  pour ses propres besoins. Le déploiement des femto-cellules pose des problèmes sérieux vu que [21] il n’y a pas de coordination centralisée entre ces femto-cellules, et entre ces femto-cellules et la macro-cellule puisqu’elles sont

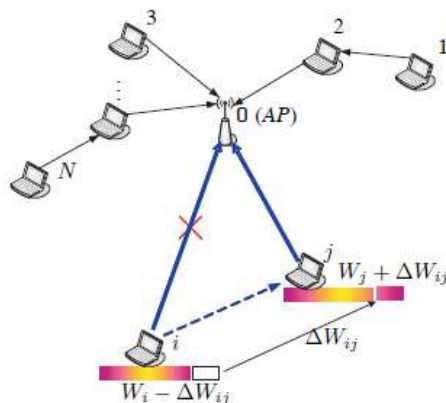


Figure 4 Coopération par Echange de Bande Passante

déployées de manières ad-hoc. Cela entraîne aussi un problème de timing et de synchronisation pour la réception correcte des signaux et pour les handovers. Il ne faut surtout pas modifier l’infrastructure existante pour s’accommoder aux nouvelles femto-cellules, etc.

La densification spatiale pose des défis importants, surtout dans les environnements mobiles à grandes vitesses où les handovers sont fréquents, pouvant entraîner une dégradation des performances du réseau. Elle appelle aussi des techniques complexes pour combattre les interférences source de dégradation des performances.

Avec ces schémas, on est toujours dans le cloisonnement spectral ; ils sont limités à un réseau particulier et sont coûteusement transférables aux réseaux hétérogènes multi-RATs. Ils illustrent, cependant, la complexité du traitement des interférences, qui reste un problème fondamentale de toutes les communications sans fil.

## 1.4 Partage Du Spectre Sous-Licence

Les futurs réseaux (ex : LTE-Advanced et au-delà) auront besoin de transporter des charges de trafic nettement plus élevées par rapport aux réseaux de communication mobile existants, pour répondre au trafic mobile croissant. De plus, ces réseaux nécessiteront de nouvelles bandes de spectre avec des bandes passantes plus larges pour leurs opérations. Il existe différents types de bandes de spectre pour les réseaux cellulaires mais une bande de spectre affectée uniquement à un seul ORM (sous-licence) continue d’être l’option préférée du point de vue des ORMs pour garantir une bonne QoS et une certitude opérationnelle. Alors que la disponibilité de telles bandes de spectre libres devient restreinte, à l’avenir, l’ORM pourrait partager le spectre d’un autre utilisateur titulaire du spectre avec des règles

et des conditions qui ressemblent à des licences. Une telle approche de partage du spectre est complémentaire des opérations sous/exempt de licence traditionnelles, et elle est actuellement à l'étude dans la recherche, la réglementation, et la normalisation [6].

## Méthodes d'Accès Pour Les Bandes Sous-Licence

Les méthodes d'accès avec licence actuellement disponibles pour les bandes sous-licence sont les suivantes :

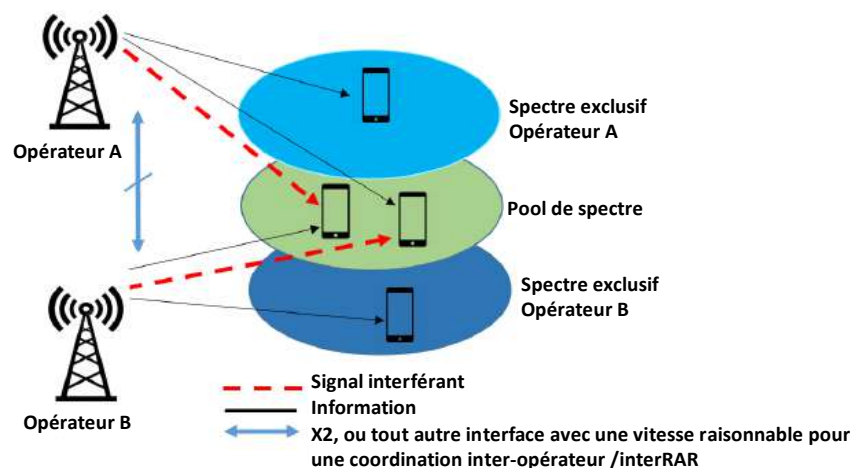


Figure 5 Transmission multi opérateurs sur un pool de spectre

**Accès partagé Co-primaire :** L'utilisation Co-primaire du spectre implique que les titulaires de licence, sous réserve des autorisations de l'ARN, utilisent conjointement leur spectre sous licence (généralement une partie de celui-ci) de manière partagée par le biais d'accords mutuels entre eux ou sous l'obligation de l'ARN. Il convient de noter que, sur la base de cette méthode, les utilisateurs des différents ORMs ont des droits d'accès égaux sans que des priorités soient fixées par règlement [22]. Les deux méthodes d'accès qui relèvent de l'accès partagé Co-primaire sont :

- 1) *Regroupement du spectre en Pool* (Figure.5): l'ARN, au lieu d'attribuer spécifiquement des bandes sous-licence particulières à un ORM, les attribue à un certain nombre d'ORMs (nombre limité). Ce mode d'accès offre aux ORMs la possibilité d'accéder à des bandes sous-licence supplémentaires sur une base partagée, quand et où cela est nécessaire, et améliore donc l'efficacité d'utilisation du spectre. Cependant, même l'accès simultané aux bandes de tous les ORMs s'avère encore insuffisant pour répondre à la demande de capacité. Dans le cadre d'accords bilatéraux / multilatéraux entre ORMs, des règles spécifiques peuvent être définies pour atteindre le niveau juste / raisonnable de garanties d'accès au spectre, ainsi que pour empêcher la réutilisation agressive / non coordonnée du spectre, de sorte que la QoS

puisse être garantie. Ce système d'accès en tant qu'opportunité complémentaire semble être bénéfique pour les ORM pour atteindre leurs objectifs de QoS et leurs demandes de capacité, avec des frais de licence considérablement inférieurs par rapport aux enchères, ainsi que leur propre spectre sous-licence dédié.

- 2) *Location mutuelle* (Figure.6) : dans ce mode d'accès, les bandes sous-licence qui ont déjà été attribuées à un ORM sur une base exclusive peuvent être louées à un ou plusieurs autres ORM sous réserve de l'autorisation de l'ARN respective. Cela fournit à l'ORM une source supplémentaire de revenus provenant de son spectre temporairement inutilisé et améliore l'efficacité d'utilisation du spectre. Ce schéma est avantageux pour un ORM qui fait face à une pénurie de capacité temporaire et qui nécessite plus de spectre sous licence pour répondre aux exigences de débit / capacité de données élevées avec une QoS garantie et des frais de spectre moins chers par rapport au cas de l'accès exclusif. Cependant, dans cette méthode d'accès, le propriétaire du spectre a la priorité de préemption pour accéder à son propre spectre à tout moment, contrairement au cas de la mise en commun du spectre. Par conséquent, ce schéma

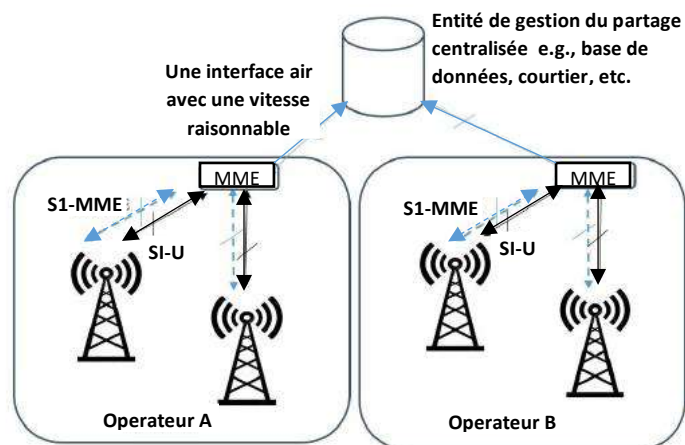


Figure 6 Location mutuelle coordonnée inter-opérateurs via une entité tierce centrale

d'accès semble être plus avantageux lorsque l'on s'attend à ce que le spectre reste inutilisé pendant une longue période de temps, ou bien par la détection instantanée d'opportunité de spectre, en tirant parti de la diversité du trafic dans le temps / emplacement.

**Accès Partagé Sous-Licence/Autorisé** : Ce type de partage est catégorisé comme suit :

- 1) *Accès partagé autorisé (APA)* : Cette méthode d'accès a été développée dans le but d'utiliser des bandes spécifiques de télécommunication mobile internationale (IMT), initialement 2,3

GHz (au Royaume-Uni) et 3,8 GHz (aux États-Unis), sur une base partagée et de non interférence pour les services mobiles.

- 2) *Accès partagé sous-licence (APL)* (Figure.7) : Le concept APL vise à permettre une utilisation dynamique du spectre à chaque fois et partout où il n'est pas utilisé par l'utilisateur du titulaire du spectre sur un base volontaire [23]. Il est particulièrement destiné aux systèmes de communication mobiles, tels que LTE-Advanced, pour fonctionner sur une base partagé et sans interférence, sous réserve d'une autorisation individuelle (c.-à-d. licence), dans les bandes attribuées au service mobile et identifié pour les IMT par l'UIT-R mais actuellement utilisé par d'autres systèmes primaires titulaires. C'est différent du "trading" de spectre, où le détenteur actuel des droits d'utilisation du spectre les transfère à une autre entité. L'APL est destiné aux situations où le titulaire et le détenteur de licence APL sont de natures différentes (par exemple, gouvernemental vs commercial [23]).
- 3) *Système d'accès au spectre (SAS)* : Ce schéma est un cadre plutôt similaire au APL, défini par la FCC et cible actuellement les bandes 3,55-3,7 GHz pour améliorer l'efficacité d'utilisation du spectre. Dans le contexte de SAS, cependant, trois niveaux sont identifiés. Le

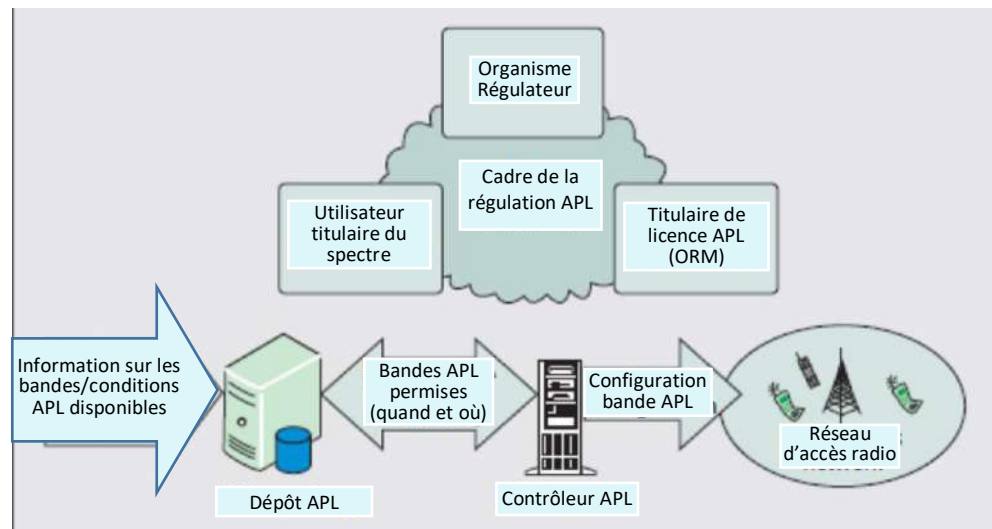


Figure 7 Aperçu des parties prenantes clés et des éléments du concept APL

premier niveau, similaire au cadre APL, est le système titulaire. Le deuxième niveau est appelé licence d'accès prioritaire (LAP), qui peut être un ORM. Contrairement à la APL, un troisième niveau appelé accès général autorisé (AGA) a également été défini et offre des garanties d'accès inférieures à celles du PAL. Le niveau de protection contre les interférences entre les niveaux est réduit de haut en bas. Mais à l'instar de la APL, SAS offre des frais de licence inférieurs à ceux de l'accès exclusif.

Pour ces types de partage de spectre, le fait que c'est payant pose la question de l'organisation du marché des ressources et sa régulation. Ensuite, il faut considérer que les différents réseaux impliqués doivent ajouter dans leurs architectures une fonction pour la gestion de cet aspect. Il faut noter aussi que, dans ce cas, les réseaux sont interdépendants et qu'il faille alors définir une interface pour les interactions et penser aux performances nécessaires de celle-ci. Se pose alors la question de savoir l'échelle de temps à laquelle se partage pourrait se faire. Enfin, il faut signaler qu'il restera, encore, une part de sous-utilisation du spectre.

## 1.5 La Radio Cognitive

Le concept de la radio cognitive (RC) fût proposé par Dr Mitola [24] [25], puis alors Haykin [26] défini la RC du point de vue systèmes de communication, soulignant que c'est un système de communication intelligent qui peut capter l'utilisation du spectre environnant, automatiquement, et utiliser le spectre libre sans affecter les communications normales des utilisateurs possédant une

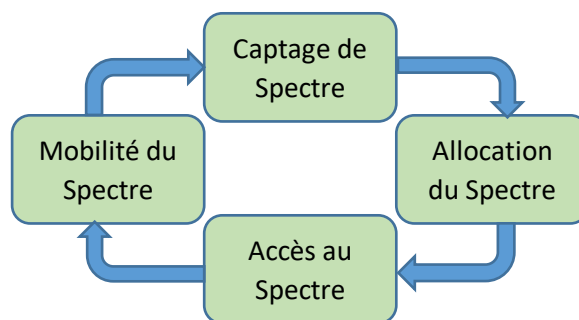


Figure 8 Cycle du partage de spectre opportuniste

licence d'exploitation de ce spectre. L'idée centrale de la RC [9] est de réaliser le partage du spectre à travers un accès dynamique à celui-ci, par les utilisateurs secondaire USs (qui non pas de licence) sous réserve qu'ils n'interfèrent pas avec les utilisateurs primaires UPs (titulaires de licence). Typiquement, le partage de spectre selon la vision RC comprend un cycle de quatre étapes, comme illustré par la Figure.8. Le **captage de spectre**, est la première étape du cycle et consiste à scruter une bande spectre donnée pour y détecter la présence éventuelle d'un UP. Dans le cas négatif un trou spectral est déclaré disponible et l'accès y est permis, sinon le spectre est déclaré comme occupé, l'accès y est interdit, et les USs qui l'utilisaient sont sommés de le libérer. L'**allocation du spectre**, est basée sur la disponibilité de trous spectraux et consiste à les distribuer aux USs. L'**accès au spectre**, coordonne les accès multiples des USs aux trous spectraux, évitant les conflits entre UPs et Us, d'une part, et entre USs d'autre part [27]. Le **mobilité du spectre**, désigne l'opération de passage vers un spectre approprié dans l'une des trois situations suivantes : l'apparition d'un UP, le

changement de l'emplacement géographique des USs alors que celle des UPs ne change pas, les bandes de fréquence utilisées par les USs ne répondent plus aux exigences de ces derniers.

Technologie prometteuse, la radio cognitive (RC) peut être utilisée par le réseau cellulaire pour exploiter les trous dans le spectre, à la demande. En employant la radio cognitive, le réseau cellulaire devient un réseau cellulaire cognitif (RRC). Dans le RRC, grâce à la collecte du spectre, une ressource supplémentaire peut être utilisée pour le délestage du trafic ou une décharge de la capacité. Outre la collecte du spectre, le RRC peut également soutenir de nombreuses applications prometteuses. Par exemple, la RC peut être utilisée pour atténuer les interférences intercellulaires entre les macro-cellules et les petites cellules, qui devraient être déployées de manière dense et sous-tendre la macro-cellule dans le réseau cellulaire. Avec la RC, les petites stations de base cellulaires (BS) peuvent utiliser la détection de spectre avant d'accéder au spectre pour atténuer les interférences [28]. En outre, les utilisateurs peuvent régler les paramètres de transmission pour atteindre différents objectifs (par exemple, l'efficacité énergétique ou un débit de transmission élevé) en fonction de leurs contextes de fonctionnement [1]. Il y a aussi une utilisation potentielle dans les réseaux de capteurs sans-fil [29].

### 1.5.1 Une Architecture De RRC

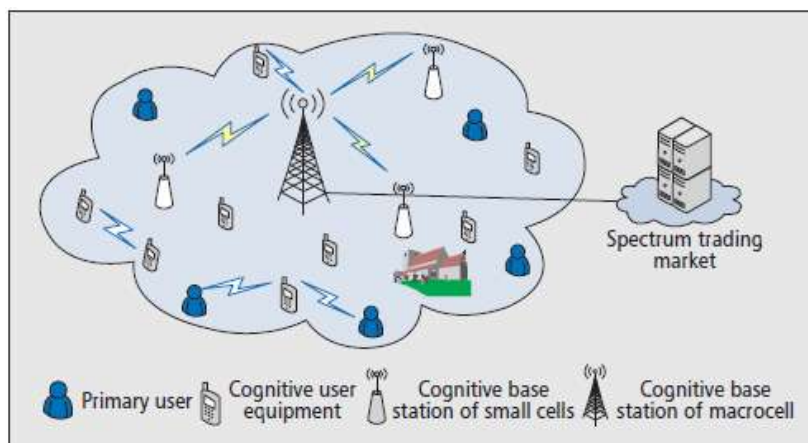


Figure 9 Architecture réseau cognitif

Les SBs des macro-cellules et des petites cellules peuvent être connectées à un serveur externe du marché d'échange de fréquences [1], ce qui facilite l'échange/la location de fréquences entre le CCN et d'autres systèmes disposant de bandes de fréquences sous licence. Les CCU peuvent exploiter les trous dans le spectre par la détection ou l'échange de spectre. Le fonctionnement du CCN peut être centralisé, la station de base coordonnant les CCU pour le spectre l'exploitation et le partage du spectre. Le CCN peut également fonctionner de manière décentralisée, où les CCU acquièrent le spectre disponible et l'accès sans un contrôleur central, Figure.9.

## 1.5.2 Approches pour la collecte de spectre

Dans [30], les techniques proposées pour l'identification des OSRs sont la détection du spectre (SS), la détection de spectre coopérative (CSS), les bases de données de géolocalisation (GL-DB) et la

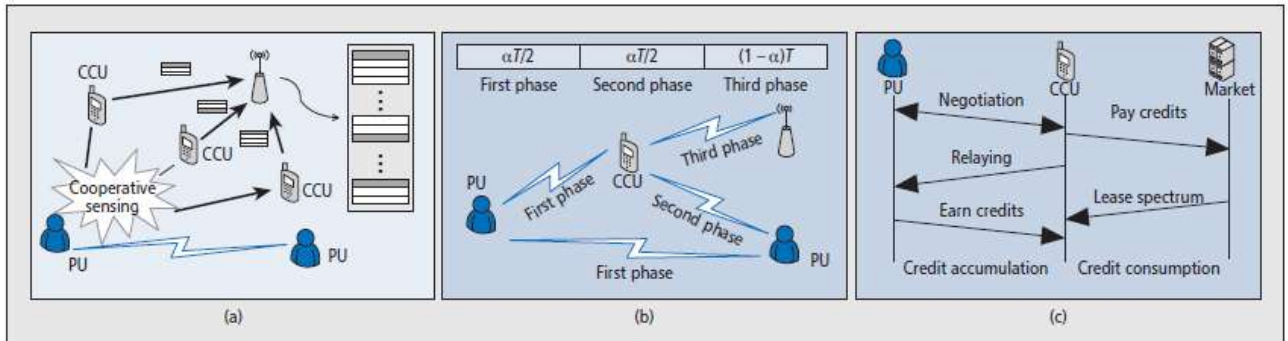


Figure 10 Récoltes de Spectre coopératives

signalisation par balise. Les schémas hybrides sont aussi intéressants dans la mesure où ils peuvent dépasser les limitations de chaque techniques individuelle. Dans [31], les approches pour la collecte de spectre comprennent la base de données de géolocalisation, le captage de spectre, et l'échange de spectre, Figure.10. La procédure pour l'approche de la base de données de géolocalisation est la suivante. La CCU envoie une requête à la base de données de géolocalisation avec ses informations de localisation. Ensuite, la base de données renvoie les informations sur la disponibilité des canaux pour le lieu donné. Le captage de spectre est une opération clé de la collecte du spectre. Les CCU effectuent ce captage pour détecter les trous dans le spectre et empêcher les interférences avec les PU. L'échange de fréquences permet d'échanger les ressources du spectre entre différentes parties, à court ou à long terme. Les ressources pour les échanges peuvent être les bandes de fréquences disponibles, le maximum la puissance de transmission autorisée, et la durée d'accès dans les bandes de fréquences [31]. Les CCUs peuvent obtenir des droits exclusifs temporaires d'utiliser le spectre en payant un certain montant d'argent lorsque les PUs sont prêts à louer en contrepartie de récompenses monétaires. Pendant la transmission, les CCU ne seront pas interrompus par les PUs, afin que la QoS puisse être garantie, à un certain degré.

## 1.5.3 Limites Des Approches de Collecte du Spectre

*Base de données de géolocalisation* : Pour connaître la disponibilité des canaux, il faut disposer d'informations de géolocalisation, qui sont généralement obtenues à partir du système de positionnement global (GPS). Cependant, certaines CCU peuvent ne pas avoir de fonctions GPS. En outre, les informations de géolocalisation peuvent être inexactes en raison de la mauvaise qualité des signaux GPS à certains endroits.

*Captage de spectre* : Les performances du captage de spectre sont limitées par plusieurs facteurs comme l'évanouissement par trajets multiples et l'ombrage. Plus précisément, lorsque la CCU fait l'expérience de ces phénomènes, la réception d'un signal du PU sera fortement dégradée, ce qui réduit considérablement la précision de la détection. En outre, pour les UCC qui sont hors de la transmission de l'émetteur primaire, il est impossible pour eux de détecter la présence de l'UP. Par conséquent, les CCUs pourraient commencer à émettre, ce qui provoquerait des interférences avec le récepteur principal. De plus, une fois que l'UP récupère le canal, les CCU doivent quitter les canaux actuels et trouver d'autres canaux inactifs, ce qui entraîne des transmissions intermittentes.

*Le commerce du spectre* : Les CCUs peuvent avoir des droits d'accès exclusifs au spectre par le biais de l'échange de fréquences, de sorte que la qualité de service puisse être garantie. L'échange de spectre à long terme pose toujours le problème du gaspillage du spectre, car les CCUs peuvent ne pas avoir de trafic à un moment précis en raison de la nature par rafale du trafic. Pour les opérations de courte durée ou même en temps réel, l'utilisation du spectre peut être améliorée. Toutefois, du point de vue de CCN ou CCU, en plus de l'aspect opérationnel et les frais d'entretien, l'argent supplémentaire doit être payé lors de l'achat du spectre sur le marché. Sur une longue période, le coût pourrait être assez élevé, ce qui entraîne une charge pour le CCN ou CCU. Du point de vue des UPs, ils pourraient ne pas rechercher uniquement des avantages monétaires. Dans certains cas, les syndicats souhaitent également améliorer les performances de transmission (par exemple, augmenter le débit lorsqu'ils ont un grand volume du trafic). Les mécanismes d'échange existants ne prennent pas en compte ces types de besoins des UPs.

## 1.6 Exploitation du spectre sans licence

La transition de la transmission TV analogique vers la transmission digitale a suscité d'importants développements dans une bande de spectre de choix, allant de 54 MHz à 806 MHz. D'abord, 108 MHz de spectre dans la bande des 700 MHz est devenue disponible pour les services mobiles (entre autres applications). Ensuite, la compacité des signaux TV et la répartition fragmentée de la bande de diffusion (*broadcast band plan*) rendent disponibles une large quantité "d'espaces blancs". Les espaces blancs (*white spaces*) désignent des fréquences sous la plage des 700 MHz qui sont disponibles pour un usage sans licence préalable. La bande entre 54 MHz et 698 MHz est réservée

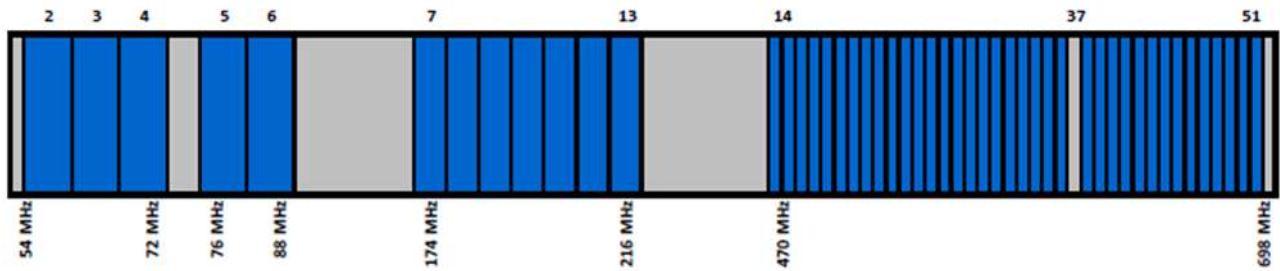


Figure 11 Spectre des bandes des espaces blancs TV

pour la diffusion TV, comme le montre la Figure.11, mais inclus aussi d'autres applications sans licence préalable telle que les microphones sans fil, utilisé dans des endroits permanents ou pour des événements temporaires. Pour limiter l'interférence de canal adjacent entre les canaux TV, le plan de répartition contient des "espaces blancs", fréquences où aucune transmission n'est permise pour protéger l'intégrité des signaux TV. Ces fréquences possèdent des caractéristiques appréciables, telles que la propagation en l'absence de ligne de vue, un bruit industriel bas, et des tailles d'antennes raisonnables pour les applications de large bande fixes et nomades. Bien que la quantité de spectre inutilisé varie d'une zone à une autre, de larges espaces blancs sont disponibles hors zones métropolitaines à cause du petit nombre de stations TV là-bas.

### 1.6.1 STANDARD IEEE 802.22

Le IEEE 802.22, est un standard pour des appareils sans fil opérant dans les espaces blancs. Le standard implémente des techniques de radio cognitive pour permettre un accès dynamique, en conformité avec les règles et réglementations que le FCC a fixé pour cette bande. La radio cognitive observe son environnement (i.e. captage de spectre/détection d'interférence) et ajuste son comportement en transmission (e.g. fréquence, puissance) pour s'accommoder à son environnement. Dans cet environnement, une attention particulière doit être accordée à la détection de la présence de trois types de systèmes, à savoir [32]:

- Les diffuseurs TV qui ont fixé aux signaux TV une limite stricte pour être détectés de manière fiable (probabilité de détection > 90%, fausse alarme < 10% pour un signal de -116 dBm qui correspond en gros à un SNR de -21 dB).
- Les microphones sans fil qui opèrent avec une basse bande passant, basse puissance, et n'importe où dans un canal TV. Ceci les rend difficiles à détecter et protéger.
- Les signaux VHF/UHF qui se propagent sur des distances plus longues que celles des signaux de plus hautes fréquences. Diverses cellules de WRANs utilisant des fréquences similaires vont vraisemblablement créer des interférences Co-canal.

L'accès dynamique au spectre implique la capacité à accéder aux parts de spectre inutilisées par d'autres systèmes sur une base temporelle et fréquentielle.

### 1.6.1.1 Architecture de Référence

Le standard définit le modèle de référence du protocole PRM (*protocol reference model*) adopté, Figure.12. La définition d'un tel PRM est importante car elle donne une idée de l'architecture du système, des fonctionnalités des différents blocs, et leurs interactions mutuelles. Le PRM proposé, divise le système en trois plans, à savoir le plan cognitif, donnée/contrôle, et gestion [33]. Les plans donnée/contrôle et gestion (composants non cognitifs), ressemblent à ceux des standards IEEE 802.16. La fonction de *capture-de-spectre SSF (spectrum-sensing function)* et la fonction de géolocalisation, qui ont une interface avec l'étage RF de l'appareil, fournissent l'information au gestionnaire de spectre SM (*spectrum manager*) sur la présence de signaux des titulaires (utilisateurs primaires ayant droit à ce spectre), aussi bien que la localisation actuelle. Le SM est responsable des tâches les plus importantes, telles que le maintien des informations sur la disponibilité du spectre, la sélection des canaux, la gestion des canaux, l'ordonnancement de l'opération de détection du spectre, l'accès à la base de données, l'application des politiques de la norme IEEE 802.22 et du domaine réglementaire, permettre l'auto-coexistence, etc [33]. Le SM doit attribuer le *canal d'exploitation* aux modules MAC/PHY dans le WRAN. Le SM doit également définir le ou les *canaux de secours* et leurs priorités correspondantes. Le reste des canaux qui sont potentiellement disponibles pour l'exploitation, mais qui ne sont pas sélectionnés comme canaux d'exploitation ou comme de secours, peuvent être classés comme *canaux candidats, occupés* ou *interdits*. Le SM coté CPE (Customer Premise Equipment) est appelé automate de spectre (*SA spectrum automaton*), parce que presque toute l'intelligence et les capacités de prise de décision résident dans le SM de la station de base qui contrôle le comportement du SA.

Le IEEE 802.22, implémente deux techniques qui permettent d'être au fait de l'environnement spectral :

- la géolocalisation qui implique la connaissance des coordonnées géographiques des appareils de l'espace blanc sans licence et l'accès à une base de données des utilisateurs ayant une licence et les canaux disponibles pour une utilisation sans licence.
- le captage spectral implique la surveillance du spectre et l'identification des canaux occupés par des utilisateurs ayant une licence.

La couche physique est basée sur la technologie d'accès OFDMA avec 2048 porteuses, et le mode d'accès TDD avec une possibilité pour le mode FDD.

La couche MAC met en œuvre plusieurs mécanismes pour éviter de causer des interférences aux utilisateurs titulaires de licences existants, et pour la coexistence entre les appareils 802.22. La structure des trames IEEE 802.22 est une extension de celle des structures des trames IEEE 802.16-2004 et IEEE 802.16<sup>e</sup> exception faite de l'ajout d'un fenêtre de coexistence (Self Coexistence Window SCW). Des paquets de balises de coexistence (Coexistence Beaconing Packets CBPs) sont

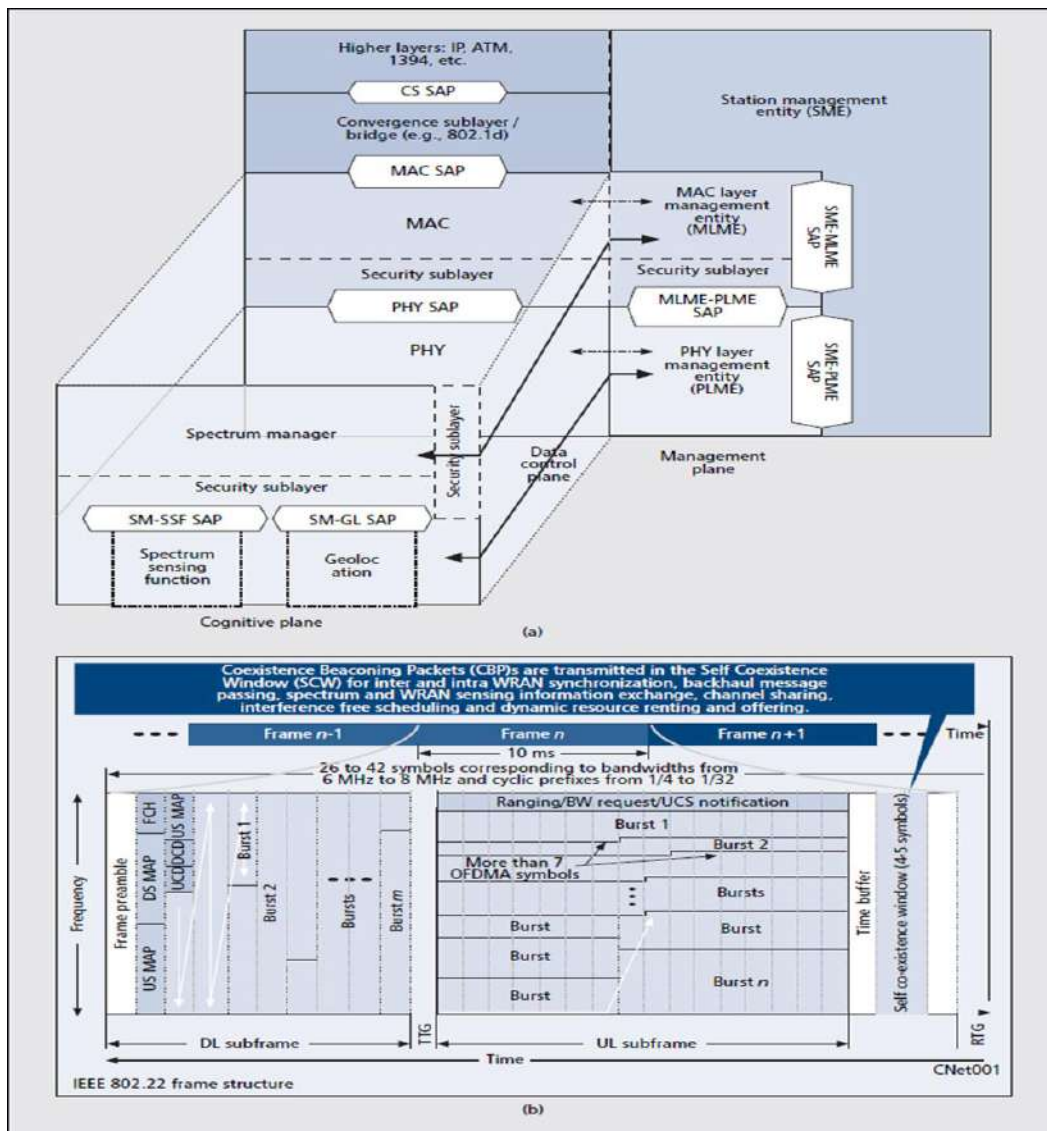


Figure 12 a) Diagramme d'interface radio cognitive pour le standard IEEE 802.22 ; b) Structure de la Trame IEEE 802.22

envoyés dans la fenêtre SCW pour des raisons de synchronisations inter et intra WRAN, de passage de messages du réseau terrestre lorsque la connectivité de celui-ci n'est pas disponible, d'échange d'information de captage de spectre/WRAN, de partage de canal, d'ordonnancement sans interférence, de location/offre de ressource dynamique, ou bien d'accès concurrent au canal [32].

Un autre mécanisme consiste en une période de silence où la station de base et les CPEs cessent d'émettre pour détecter le spectre, à la recherche d'émetteurs existants. Deux types de détection sont définis :

- Détection rapide : un algorithme rapide (moins de 1 msec par canal) est utilisé pour détecter l'énergie électromagnétique.
- Détection fine : si une énergie supérieure au seuil est déterminée lors de la phase de détection rapide, une détection fine est utilisée pour chaque canal de fréquence unique afin de rechercher des signatures particulières des signaux transmis. L'exécution des algorithmes de détection fine peut prendre jusqu'à quelques millisecondes.

La détection du spectre est effectuée à la fois au CPE et à la station de base à l'aide d'une antenne omnidirectionnelle de 0 dBi montée à une hauteur de 10 m.

La technologie de géolocalisation par satellite (par exemple, le GPS) est utilisée pour déterminer l'emplacement des appareils sans licence. L'accès à la base de données des titulaires de licence, qui comprend à la fois la diffusion TV aussi bien que les emplacements d'autres appareils enregistrés est recherchée afin d'éviter la transmission sur les canaux occupés. Un CPE doit localiser ses coordonnées avant de s'associer à une station de base.

### 1.6.1.2 Mécanismes de coexistence

Un système de coexistence contient deux mécanismes de base pour traiter la coexistence des WSO dans les espaces blancs de télévision : la gestion de la coexistence et la découverte des voisins. La gestion de la coexistence est le mécanisme par lequel les CMs d'un système de coexistence déterminent comment des WSOs potentiellement interférents peuvent partager efficacement un ensemble de ressources radio. La découverte des voisins est le mécanisme par lequel les CMs découvrent les WSOs potentiellement interférents. En outre, la découverte de voisinage permet aux CM d'obtenir toutes les informations relatives aux voisins nécessaires pour communiquer avec eux [34].

#### **Gestion de la coexistence**

La gestion de la coexistence est le mécanisme par lequel un CM sert les WSOs afin qu'ils puissent fonctionner efficacement dans les canaux disponibles de la bande TVWS. Le CM détermine comment partager les ressources radio entre un ensemble d'OSW qui risquent de se brouiller mutuellement. Pour les WSOs, cela se traduit par un ensemble de services de coexistence qui sont disponibles pour eux. Chaque CM doit fournir les types de services suivants pour les WSOs :

- Service d'information, et
- Service de gestion.

Pour les WSOs qui sont abonnés au service d'information, le CM fournit des informations sur les autres utilisateurs des ressources radio disponibles. Pour ces WSOs, le CM ne détermine pas les paramètres d'exploitation mais toutes les décisions sont prises par le WSO.

Pour les WSO qui sont abonnés au service de gestion, le CM fournit soit un ou plusieurs canaux TV à exploiter, soit une fréquence d'exploitation à utiliser. Un ou plusieurs canaux TV sont donnés aux WSOs qui ont souscrits au mode canal TV du service de gestion. Une fréquence de fonctionnement est donnée aux WSOs qui sont abonnés au mode de fréquence de fonctionnement du service de gestion [34]. Lorsqu'un WSO est abonné au service d'information, il reçoit de la part du CM des informations sur les voisins et l'environnement radio. Le WSO détermine ses propres paramètres de fonctionnement et il doit les indiquer au CM. Un CM doit émettre des commandes de reconfiguration aux WSOs qui sont abonnés au service de gestion. Le CM peut également émettre des demandes de mesure pour ces WSOs.

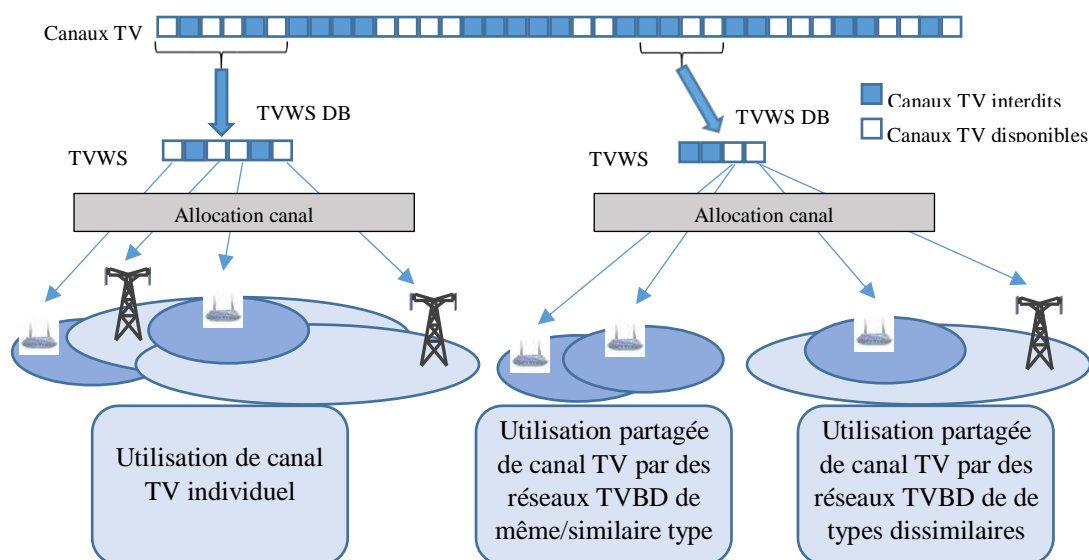


Figure 13 Méthodes d'allocation de canal

Chaque CM doit mettre en œuvre les trois lignes directrices suivantes lors de la prise de décisions en matière de coexistence, indépendamment de l'algorithme utilisé Figure.13 :

- Premièrement, un canal d'exploitation d'OSW sans chevauchement est sélectionné pour chaque WSO afin d'éviter les interférences de type co-canal.
- Si cela n'est pas possible, regrouper les WSO similaires dans le domaine des fréquences.
- Si même cela n'est pas possible, commencer à diviser les canaux de fonctionnement des WSOs, par exemple dans le domaine temporel, le domaine du code ou le domaine des fréquences.

Le standard définit plusieurs algorithmes pour la prise de décision de coexistence, ce qui traduit la complexité des problèmes à traiter et la multitude de scénarios qui peuvent se présenter dans un tel

contexte d'exploitation du spectre. En effet, l'accès libre au spectre pose le problème épineux de coexistence entre les différents réseaux qui veulent l'exploiter. Chaque réseau n'est pas nécessairement au courant des autres, il n'est synchronisé sur eux, et donc ne coordonne pas ses actions avec eux. Chaque intervenant, doit entrer en compétition avec les autres pour l'exploitation des canaux dans ce spectre. Cela introduit un degré d'incertitude quant à la disponibilité des canaux au cours du temps, et peut entraîner une compétition sur une partie du spectre au dépend des autres. Ceci nécessite un équilibrage de charge qui appelle des solutions adéquates. Tous ces facteurs réunis réduisent l'efficacité d'utilisation du spectre ; cela est encore plus vrai dans les milieux urbains denses où la compétition est plus dure.

### 1.6.2 Standard ECMA-392

Ce standard, spécifie une sous-couche de contrôle d'accès au support (MAC) et une couche physique (PHY) pour les réseaux sans fil cognitifs personnels/portables fonctionnant dans les bandes TV. Le standard spécifie également une sous-couche MUX pour les protocoles des couches supérieures.

Deux ou plusieurs dispositifs communiquant sur le même canal physique constituent un réseau. Il existe trois types de dispositifs : le dispositif maître, le dispositif esclave et le dispositif pair. Un réseau de base fonctionne dans l'un des deux modes de formation de réseau de base : le mode maître-esclave ou le mode pair-à-pair. Un réseau pair-à-pair diffère d'un réseau maître-esclave principalement en ce que les dispositifs peuvent former un réseau en mode pair-à-pair et coordonner l'accès aux canaux par un balisage distribué et la réservation de canaux [35].

L'architecture de ce service MAC est soit coordonnée par un maître, soit entièrement distribuée. La coordination des dispositifs dans la limite de la portée radio est assurée par l'échange de trames de balises et/ou de commande. La transmission périodique de balises permet la découverte des dispositifs, la prise en charge l'organisation dynamique du réseau et la mobilité. Les balises fournissent la synchronisation de base du réseau et transportent des informations de réservation et d'ordonnement pour l'accès au support.

La structure temporelle de base pour l'échange de trames est une super-trame composée de 256 slots d'accès au support (MAS). Une super-trame récurrente comprend une période de balise (BP), une période de transfert de données (DTP) et une fenêtre de signalisation de contention (CSW). Une fenêtre de signalisation basée sur la réservation (RSW) pourrait être ajoutée juste après la BP pour prendre en charge l'échange de signaux entre un dispositif maître et un dispositif esclave en mode maître-esclave, Figure.14. Les fenêtres de signalisation et la période de balise sont utilisées pour

envoyer et recevoir des informations de contrôle et de gestion. Tous les appareils qui utilisent le même canal doivent utiliser la même structure de super-trame.

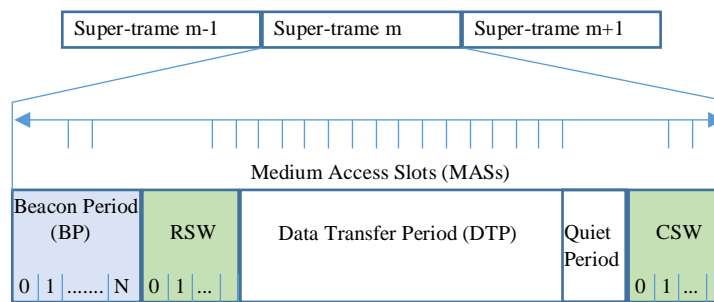


Figure 14 Structure de la super trame MAC

Un appareil est défini comme un appareil de balisage s'il possède un emplacement de balisage dans BP et transmet régulièrement des balises. Un appareil pair ou un appareil maître est par défaut un appareil de balisage. Un appareil esclave est normalement un appareil qui n'émet pas de balises, sauf s'il est promu au rang d'appareil de balisage. Tous les appareils esclaves doivent être capables de transmettre des balises régulières, si le dispositif maître le décide.

Tous les dispositifs doivent rester éveillés pendant la période de balisage et le CSW afin de capturer toutes les informations de contrôle/gestion qui pourraient être pertinentes pour chaque appareil. Un appareil peut échanger des données, surveiller l'état du canal ou passer en mode veille pendant la période de transfert de données (DTP).

Un dispositif doit mesurer le canal de fonctionnement pour déterminer sa vacuité, mesurer le canal adjacent afin de déterminer la puissance de transmission maximale autorisée, mesurer, mesurer d'autres canaux pour déterminer la disponibilité pour un usage futur.

Afin de détecter la présence d'un titulaire à des intensités de signal très faibles, tous les dispositifs voisins fonctionnant dans le même canal doivent être silencieux en même temps, afin que la fonction de détection soit efficace. Nous appelons cela la période de silence (QP).

Il existe deux types fondamentaux de mécanismes d'accès aux canaux pour le transfert de données pendant la période DTP. Le premier est l'accès par contention avec priorité (PCA), le second est l'accès par réservation de canal (CRA).

Comme pour le cas précédent, le problème de la coexistence se pose avec insistance. Le standard, trois scénarios d'auto-coexistence de base, à savoir : i) Auto-coexistence entre deux réseaux basés sur le principe maître-esclave ; ii) Auto-coexistence entre deux réseaux pair-à-pair ; iii) Auto-coexistence entre un réseau pair-à-pair et un réseau maître-esclave. Cependant, l'extension à plusieurs réseaux n'est pas évidente puisque cela implique l'alignement de plusieurs BPs, et augmente le coût en termes de balises de contrôle échangées. De même, dans un environnement urbain dense les performances baisseront dramatiquement à cause du petit volume de spectre libre et du grand nombre de prétendants

potentiels. Il est clair aussi qu'on est dans le contexte de réseaux de petites tailles où les zones de couvertures sont limitées. Enfin, les propositions du standard ne sont pas faites pour des spectres primaires alloués aux réseaux sans fil traditionnels avec des macro-cellules causant des interférences importantes et qui comprennent des utilisateurs primaires prioritaires.

## 1.7 Agrégation de Spectre

En plus du partage de spectre, l'agrégation de spectre est reconnue comme une approche prometteuse pour réduire l'écart entre l'offre et la demande [36]. Les larges bandes-passantes sont très désirables, car elles permettent à des services à larges bandes, tels que le streaming vidéo à haute définition, de décoller. Malheureusement, dans de nombreuses régions du monde, il n'y a actuellement que peu (voire pas du tout) d'attributions contiguës de spectre de 20 MHz ou plus. L'agrégation de segments de porteuses (ASP) est la solution technique proposée pour surmonter la fragmentation du spectre, et elle semble offrir la flexibilité nécessaire pour s'adapter à une grande variété de scénarios de spectre. L'ASP est l'une des techniques les plus importantes du LTE-A. Elle permet l'extension évolutive de la bande passante via l'agrégation de plusieurs segments de bande plus petits (appelés chacun segment composant, SC), dans une bande de fréquences virtuelle plus large, afin de transmettre à des vitesses plus élevées [37]. Dans les versions 10-12 du LTE-A, il est possible d'agréger jusqu'à cinq porteuses, chacune avec une largeur de bande de 1,4, 3, 5, 10, 15 ou 20 MHz, ce qui permet d'obtenir une bande passante globale pouvant atteindre 100 MHz. Grâce à la rétrocompatibilité du LTE-A, les utilisateurs LTE traditionnels et les utilisateurs LTE-A peuvent fonctionner sous des systèmes LTE-A basés sur l'ASP, où les utilisateurs LTE ne peuvent utiliser qu'un seul SC tandis que les utilisateurs LTE-A peuvent profiter de transmissions multi-SC simultanées en exploitant l'ASP [38]. Lors de l'accès initial, un terminal compatible avec l'ASP se comporte comme un terminal des versions antérieures ; c'est-à-dire qu'il n'y a qu'un seul segment de transporteurs, appelé segment composant principal (SCP). Une fois la connexion au réseau réussie, un terminal peut être configuré (selon ses propres capacités et la configuration du réseau) avec des segments-porteurs dans la voie montante (UL) et la voie descendante (DL), qui sont appelés segments composants secondaires (SCS). Par conséquent, en réalité, un terminal peut être configuré avec plusieurs SCs même s'ils ne sont pas tous utilisés. Afin d'économiser la consommation de la batterie, le réseau peut activer / désactiver les SCs configurés pour un terminal particulier, selon les besoins.

### Modes Opératoires Dans LTE-U

La technologie LTE-U est plus adaptée aux petites zones, à cause des limitations des puissances de transmission. Durant les transmissions, un canal sous licence, appelé PCC (primary component

carrier), et plusieurs canaux sans licence, appelés SCCs (secondary component carrier), sont accessibles à un utilisateur à un instant donné. Selon la demande de trafic de l'utilisateur et la charge de la cellule, des informations de configuration peuvent être envoyées via PCC pour enlever/ajouter des SCCs, de manière dynamique.

Il y a deux modes opératoires pour LTE-U (Figure.15):

- Le mode SDL (supplemental downlink), qui est la forme la plus simple de LTE-U où le spectre sans licence est utilisé dans la voie descendante (downlink) seulement, puisque le trafic dans ce sens est typiquement plus important que le trafic dans la voie montante (uplink). Dans ce mode, un nœud LTE amélioré (eNodeB) peut exécuter la plupart des opérations requises pour des communications fiables, y compris la détection l'état d'occupation des canaux sans licence.
- Le mode TDD, dans lequel le spectre sans licence est utilisé aussi bien pour la voie descendante que la voie montante, juste comme le système LTE TDD dans les bandes avec licence. Ce mode offre la flexibilité pour ajuster l'allocation des ressources entre la voie montante et descendante, au prix d'une complexité d'implémentation supplémentaire (LBT et détection de radar).

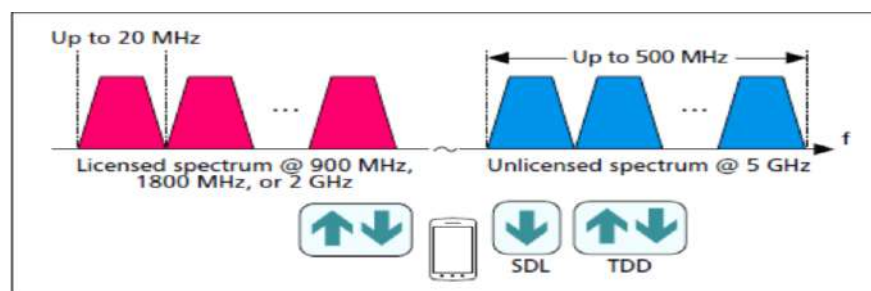


Figure 15 Deux modes d'opération de LTE-U : mode voie descendante supplémentaire et TDD

## 1.8 Exploitation adaptative des spectres avec/sans licence

Dans un déploiement dense de réseaux hétérogènes, le spectre sous licence est facilement congestionné avec un très grand nombre de petites cellules, et une gestion sophistiquée des interférences inter-cellules est donc nécessaire. Cela pousse les opérateurs à essayer d'exploiter le spectre sans licence, facilement disponible [39]. L'interfonctionnement cellulaire/WiFi a été envisagé dans les réseaux LTE, en autorisant les abonnés à utiliser de manière adaptative l'un ou l'autre des réseaux LTE (sous licence) ou WiFi (sans licence), pour fournir des services multimédia (Figure.16). Bien qu'offrant un bond de capacité pour les opérateurs, cet interfonctionnement requiert une gestion des communications à travers des TARs asynchrones, et des modifications sont nécessaires des piles de protocoles et des fonctionnalités des interfaces. Ces exigences rendent l'allocation des ressources

compliquée et la continuité de service du client difficile à garantir. A la lumière de ces questions, la technologie LTE-U (LTE-*Unlicensed Release13*) a été initiée pour permettre aux utilisateurs d'accéder au spectre sous licence et sans licence, à la fois, sous une infrastructure de réseau LTE unifiée [40]. On ne poursuit plus un fonctionnement inter réseaux cellulaire/WiFi, par exemple, mais une agrégation des deux types de spectre avec/sans licence à travers un réseau cœur EPC (Evolved Packet Core) unique.

Pour garantir une coexistence harmonieuse entre LTE-U et les autres systèmes titulaires, un certain nombre de régulations et principes sont imposés. Les éléments régulés englobent la puissance de transmission, la protection radar, les méthodes d'accès au canal, agrégation de spectre, etc. [40] :

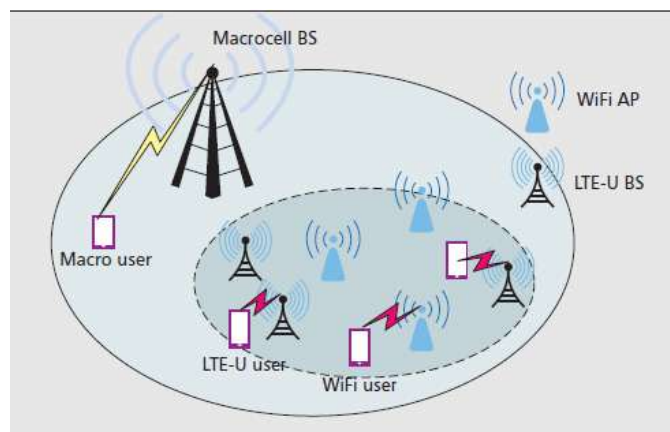


Figure 16 Exemple d'une topologie de réseau LTE-U

- *Puissance de transmission* : la régulation de la puissance de transmission est la première question qui doit être réglée quant à l'utilisation du spectre sans licence. Elle est spécifiée pour gérer les interférences entre utilisateurs sans licences. En plus, des mécanismes de contrôle de puissance sont rendus obligatoires pour réduire la puissance des transmetteurs radio au minimum nécessaire, afin d'éviter les interférences aux autres utilisateurs et/ou prolonger la durée de vie des batteries tout en maintenant la qualité de transmission des liens.
- *Protection radar et sélection dynamique de fréquence* : les systèmes radar météorologiques opèrent aussi dans le spectre sans licence des 5 GHz. Ainsi, les appareils sans licence pourraient causer des interférences non négligeables à l'unité d'émission/réception radar normale, s'ils sont laissés sans être gérés. Pour mieux protéger les radars, un mécanisme d'évitement des interférences appelé sélection dynamique de fréquence (DFS) est adopté. Sous DFS, les appareils LTE-U détectent périodiquement s'il y a des signaux radar ou non et vont commuter le canal en opération vers un canal qui n'interfère pas avec les systèmes radar au moment de la détection.
- *Ecouter avant de Parler (Listen Befor Talk)* : Les systèmes LTE-U coexistent avec les systèmes WiFi. Par conséquent, ils peuvent leurs causer des interférences préjudiciables à

leurs bon fonctionnement, puisque ceux-ci (WiFi) adoptent un MAC basé sur la contention et vont continuer à retarder leurs émissions lorsqu'ils détectent des transmissions LTE. Les appareils LTE-U sont soumis à l'obligation de détecter avant de transmettre si le canal cible est occupé par d'autres systèmes à une échelle de la milliseconde. Ce mécanisme est dénommé LBT, qui signifie qu'un appareil LTE-U peut transmettre seulement lorsqu'aucune transmission en cours n'est observée pour une période spécifiée.

*Accès assisté par le spectre sous licence* : En exploitant l'agrégation de porteuses CA (*Carrier Aggregation*), des porteuses composantes dans différentes bandes de fréquences peuvent être agrégées en une bande passante virtuelle, plus large, pour fournir des débits plus élevés. Avec CA, les messages du plan de contrôle, incluant les signaux de contrôle des ressources radio et ceux de la couche I, sont toujours transmis dans les bandes sous licence, où la QoS est toujours garantie. Les données du plan utilisateur peuvent être transmises sur les porteuses sous/sans licence de manière interchangeable. De cette façon, les informations cruciales peuvent toujours être transmises avec une garantie de QoS, alors les porteuses sans licence peuvent faire de leur mieux, pour fournir des améliorations en termes de transmissions opportunistes de données.

## 1.8.1 Techniques pour la coexistence LTE/WiFi

L'énorme différence entre les systèmes LTE et Wi-Fi pose de grands défis dans la conception d'un mécanisme de coexistence efficace. Les facteurs ci-dessus doivent être soigneusement étudiés pour concevoir un mécanisme de coexistence équitable et efficace pour les réseaux LTE et Wi-Fi dans les bandes sans licence.

### 1.8.1.1 Coexistence sans LBT

Dans les pays où il n'y a pas d'exigence réglementaire pour les LBT, un algorithme de coexistence bien conçu pourrait garantir une coexistence équitable. Les normes PHY/MAC LTE Release 10/11 prévoient trois mécanismes pour garantir la coexistence du LTE avec le Wi-Fi, dans les bandes sans licence. Avec le mécanisme de *sélection de canal*, les petites cellules LTE-U balayent la bande sans licence à la recherche des canaux inutilisés les plus propres, pour la transmission de porteuse SDL. Étant donné que s'il existe un canal inutilisé, les interférences sont évitées entre les cellules et les dispositifs Wi-Fi proches et les autres petites cellules LTE-U. Le canal d'exploitation est surveillé en permanence par l'algorithme de sélection de canal. Les mesures sont généralement effectuées, à la fois au début de la mise sous tension et plus tard, périodiquement, à l'étape de fonctionnement du SDL. Cette période est généralement de 10s. Lorsque des interférences sont détectées dans le canal

d'exploitation, le LTE-U tente de passer à un autre canal clair avec moins d'interférences. Le niveau d'interférence dans un canal est mesuré par la détection d'énergie où, initialement, la quantité et les types des sources d'interférence sont inconnus. Les mesures LTE et Wi-Fi sont engagées pour augmenter la détection des interférences [41]. L'idée de base de la **transmission avec captage-de-porteuse-adaptatif** (carrier-sensing-adaptive transmission CSAT) est de définir un cycle de service, en mode multiplexage par division de temps, durant lequel une petite cellule LTE-U transmet pendant une fraction du cycle et laisse le reste du cycle pour les transmissions des autres technologies. Le ratio "on/off" cyclique peut être ajusté de manière adaptative sur la base de l'activité des canaux captés des autres technologies pendant la période "off" [42]. Cependant, puisque le cycle de service est souvent fixé à quelques centaines de millisecondes pour assurer une durée de captage suffisante, le délai perçu par les utilisateurs LTE-U augmente considérablement. Un mécanisme similaire appelé mise en sourdine LTE (LTE muting) est proposé dans [43], où LTE est silencieux pendant  $n$  sous-trames de chaque 5 sous-trames pour abandonner le canal aux utilisateurs WiFi. La **liaison descendante supplémentaire opportuniste** (SDL) est un mécanisme qui dépend du trafic et de la demande de charge. Si la voie descendante (DL) de la petite cellule dépasse un certain seuil et qu'il existe des utilisateurs actifs dans le spectre de la bande sans licence, la porteuse SDL peut être activée pour le délestage. D'autre part, lorsque l'opérateur primaire peut facilement gérer la demande de trafic et qu'il n'y a pas d'utilisateur dans la couverture de la bande sans licence, le SDL est désactivé.

### 1.8.1.2 Coexistence basée sur le mécanisme LBT

Pour les marchés d'Europe, du Japon et de l'Inde qui nécessitent une réglementation dans le spectre sans licence nécessite un équipement plus robuste pour vérifier périodiquement la présence d'autres occupants dans le canal (écouter) avant de transmettre (parler) à l'échelle de la milliseconde. Deux mécanismes de LBT sont employés dans le LTE-LAA mandaté par l'Institut européen des standards de télécommunications (ETSI). Il s'agit du Frame based Equipment (FBE) et Load based Equipment (LBE) [44] [45].

**Dans le mécanisme LBT basé sur le FBE**, l'équipement de transmission a une période de trame fixe, où l'évaluation de canal libre ECL (clear channel assessment) est exécutée. Lorsque le canal d'exploitation actuel est atténué pour être libre, l'équipement peut immédiatement transmettre pendant une durée équivalente au temps d'occupation du canal [46]. De même, si le canal d'exploitation est occupé, l'équipement ne peut pas transmettre sur le canal pendant la période de trame fixe suivante. Le temps d'occupation du canal requis est de 1ms minimum et de 10ms maximum, et la période d'inactivité représente 5 fois le temps d'occupation du canal. Le LBT basé sur FBE est simple pour la conception du signal de réservation et nécessite moins de normalisation.

*Dans le mécanisme de LBT basé sur LBE*, l'équipement est tenu de définir si le canal est libre ou non. Contrairement au FBE, le LBE est guidé par la demande et ne dépend pas d'un cadre temporel fixé. Dans le cas où l'équipement découvre un canal de fonctionnement libre, il transmet instantanément. Dans le cas contraire, un ECL étendu (EECL) est mis en œuvre, dans lequel le canal est observé pendant une période multiple de l'intervalle de temps ECL par un facteur N [41] [43]. N est la quantité de créneaux libres pour qu'une période d'inactivité totale doive être observée avant la transmission. Sa valeur est choisie aléatoirement de 1 à q, où q a une valeur de 4 à 32. Lorsqu'un slot ECL est libre, le compteur est réduit de 1. L'équipement peut transmettre même si le compteur atteint zéro. En outre, la durée d'occupation maximale du canal est calculé par  $(13/32) * q$  ms. Par conséquent, la durée maximale d'occupation du canal est de 13 ms lorsque q est égal à 32, qui correspond au meilleur paramètre de coexistence.

### 1.8.2 Architecture Unifiée Pour Communications Cellulaires Dans Les Spectres Avec/Sans Licence

Un aspect essentiel qui fait qu'un système cellulaire fonctionne avec une grande fiabilité et une efficacité spectrale élevée, est que le "battement de cœur" du système cellulaire (i.e. signal de contrôle), est protégé non seulement avec une fiabilité élevée mais aussi une synchronisation garantie, qui est gravée dans la structure de transmission même du système cellulaire. C'est cette structure qui fait que plusieurs utilisateurs ou même des cellules opèrent de manière synchronisée.

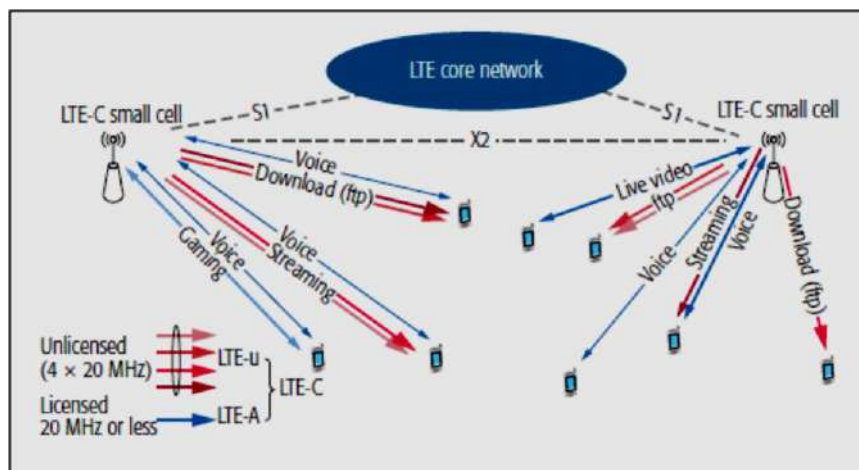


Figure 17 Illustration d'un déploiement LTE-A/WiFi

Malheureusement, ni le timing ni la fiabilité ne sont garantis pour la structure Wi-Fi DCF, sur le spectre exempt de licence. Par conséquent, dans la conception de [47], les auteurs s'appuient sur le système cellulaire traditionnel (LTE-A) pour fournir une transmission fiable des signaux/messages de contrôle entre le réseau et les appareils mobiles. C'est-à-dire, le spectre sous licence est utilisé pour le contrôle du réseau ainsi que pour d'autres services de données critiques pour la QoS.

La Figure.17, illustre un modèle de déploiement pour ce que l'auteur appelle LTE-C. Compte tenu des limites de puissance imposées aux émetteurs utilisant le spectre exempt de licence, LTE-u serait naturellement utilisé dans les petites cellules. Dans ce modèle, les cellules LTE-A sont la base du LTE-C, c'est-à-dire qu'elles servent de points d'ancrage. La composante principale du LTE-C se trouve sur le spectre sous licence utilisant le LTE-A traditionnel. Cette composante fournit un moyen fiable pour échanger des messages de contrôle critiques (en termes de temps) entre le réseau et les dispositifs mobiles, pour l'ordonnancement des ressources des bandes sous-licence et exemptes-de-licence entre les utilisateurs du LTE-C, et la prise en charge de la couverture et de la mobilité. Les bandes exemptes-de-licence de l'interface aérienne LTE-u servent de composants de transporteurs secondaires pour, principalement, le transport du trafic des données de la classe "best effort". Elles permettent, ainsi, de décharger le réseau LTE-A, de manière opportuniste. Cette configuration permet l'exploitation du spectre à ultra-large bande passante, exempt-de-licence, pour des services de données agressifs à haut débit tout en s'appuyant sur l'infrastructure cellulaire traditionnelle, sous-licence, pour des services de contrôle fiables et des services de données à haute QoS, ainsi que pour la couverture et la mobilité.

## LBT dynamique dans un cadre de transmissions fixes

Un problème important qu'il faut résoudre dans un tel déploiement est, que pour pouvoir fonctionner sur le spectre exempt de licence, un émetteur est généralement tenu de suivre une règle LBT pour éviter les interférences et, ainsi, de coexister avec d'autres systèmes (par exemple, les systèmes Wi-Fi en place) fonctionnant sur la même bande sans licence. Le mécanisme DCF Wi-Fi pour les LBT pourrait tout simplement être adopté. Toutefois, l'adoption du mécanisme Wi-Fi DCF basé sur la charge du réseau, entraîne inévitablement un décalage temporel entre les cellules des différents systèmes sans fil. D'autre part, la mise en œuvre du LBT sur la structure de transmission cellulaire basée sur la trame n'est pas simple, en raison de l'incompatibilité entre la structure de transmission LBT et LTE. L'auteur, présente une conception du LTE-u pour mettre en œuvre un mécanisme LBT efficace dans une structure LTE unifiée, basée sur la trame.

Concrètement, une cellule LTE-u doit suivre strictement la même chronologie de transmission, au sein du réseau, que la cellule LTE-A. Ceci est réalisé en utilisant le concept de LBT dynamique, dans un cadre de transmissions fixes, pour gérer le caractère aléatoire dans les bandes sans licence tout en maintenant un axe de temps stricte basée sur la trame LTE synchrone, dérivé de LTE-A sur le spectre sous licence.

Comme le WiFi DCF, le mécanisme LBT proposé est basé sur CSMA/CA pour assurer une coexistence harmonieuse avec d'autres systèmes sans fil tels que le WiFi actuel. En se référant à la

Figure.18, le LBT commence par un captage de medium utilisant le CCA (*clear channel assessment*), effectuée en continu sans respecter aucune trame ou limites de symbole OFDM, jusqu'à ce qu'il réussisse. À ce moment, un compteur CC est déclenché, avec une valeur initiale choisie aléatoirement de 0 à, par exemple, 31. Le compteur décroît tant que le CCA continue à réussir. Le LBT se termine lorsque le compteur expire. Le préambule du LTE-u est alors immédiatement transmis pour sécuriser le canal.

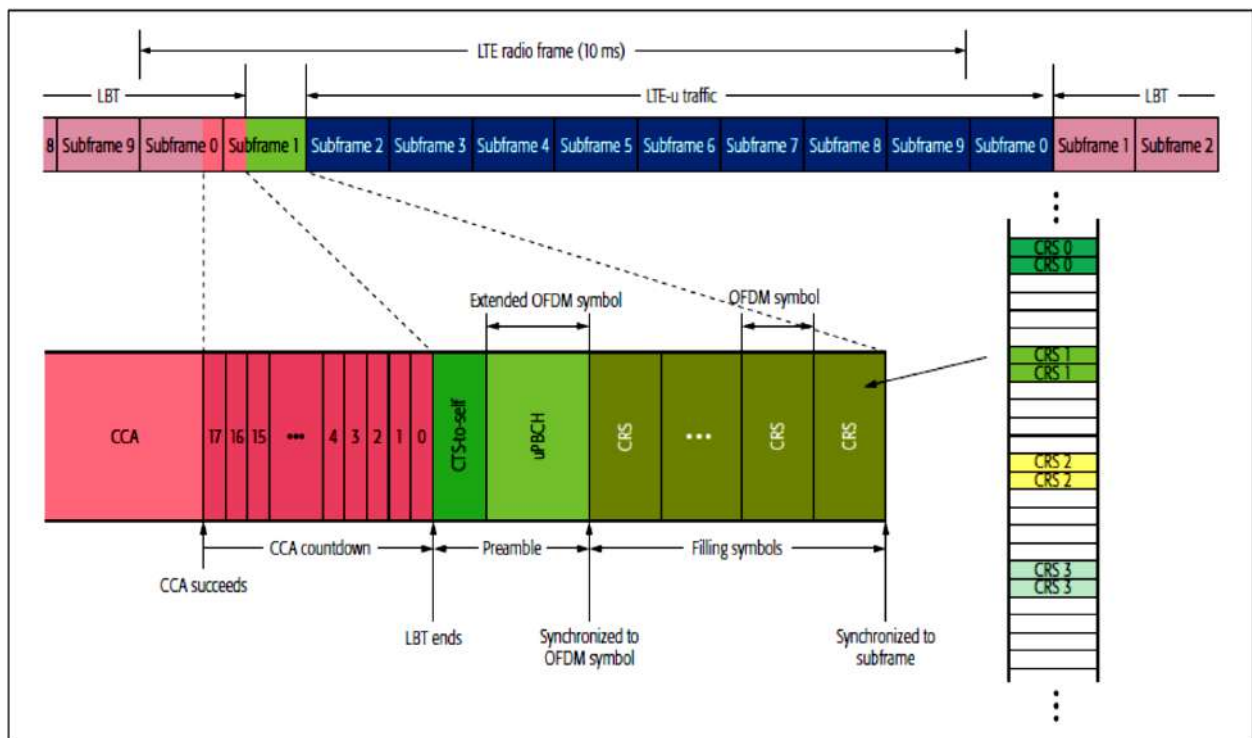


Figure 18 Implémentation de LTB basé-charge sur une structure LTE basé-trame

Comme la fin du préambule est très probablement mal alignée avec le timing des symboles OFDM du système LTE-C, le préfixe cyclique (CP) du PBCH LTE-u suivant (uPBCH) est étendu pour absorber l'écart de synchronisation, permettant la transition de la synchronisation du préambule (aléatoire) vers la synchronisation des symboles OFDM du système, qui est déterministe. Le degré d'extension est donc variable, de zéro (inclus) à un symbole OFDM (exclusif) en fonction de l'extrémité du LBT.

Afin de se synchroniser avec le timing de la sous-trame du LTE-C, le trafic LTE-u ne démarre pas avant que la sous-trame suivante (sous-trame 2 dans l'exemple de Figure.18) ne commence. Cela peut laisser un vide entre le préambule et la sous-trame. Étant donné que la fin de LBT ne garantit pas le droit d'utilisation du canal à venir (en fait, le canal est en attente jusqu'à ce que des signaux soient continuellement injectés dans le canal) il ne devrait pas y avoir d'écart entre la fin du préambule et le début de la sous-trame suivante (c'est-à-dire la sous-trame de trafic). Les signaux comme le CRS sont donc transmis entre les deux pour combler l'intervalle. La synchronisation se fait au niveau du

symbole OFDM et de la sous-trame. Lorsque l'espace entre la fin de la LBT et le début de la sous-trame suivante est inférieur à la longueur du préambule, comme le montre l'exemple de la Figure.19, le préambule chevauche sur deux sous-trames (sous-cadres 2 et 3), et jusqu'à 13 symboles de remplissage sont nécessaires pour combler le vide jusqu'au début du sous cadre 4. Lorsque cela se produit, seuls huit sous-cadres sont disponibles pour le trafic LTE-u. Le nombre de sous-cadres de trafic que le LTE-u peut occuper peut donc être de neuf ou huit sous-cadres en fonction du temps consacré au préambule (et du comblement des lacunes symboles) de telle sorte que le coût total de la chaîne le temps d'occupation ne dépasse pas 10 ms, car requis par le règlement.

Dans cette conception, le préambule spécial de la LTE-u est conduit par le signal WiFi CTS-to-self suivi par l'uPBCH. L'uPBCH contient la signature/forme-d'onde d'identification de la cellule LTE-u pouvant être lue par tous les systèmes LTE-u pour distinguer un système LTE-u d'un système WiFi. Le champ de la durée du signal CTS-to-self comprend la durée symbole uPBCH suivant (et le(s) symbole(s) de remplissage si présent) plus les sous-trames de trafic. Puisque le CTS-to-self est un signal WiFi, comme indiqué précédemment, il peut être lu par n'importe quel nœud WiFi. En tant que tel, aux yeux d'un système WiFi, le trafic LTE-u n'est pas différent d'une trame WiFi de nouvelle

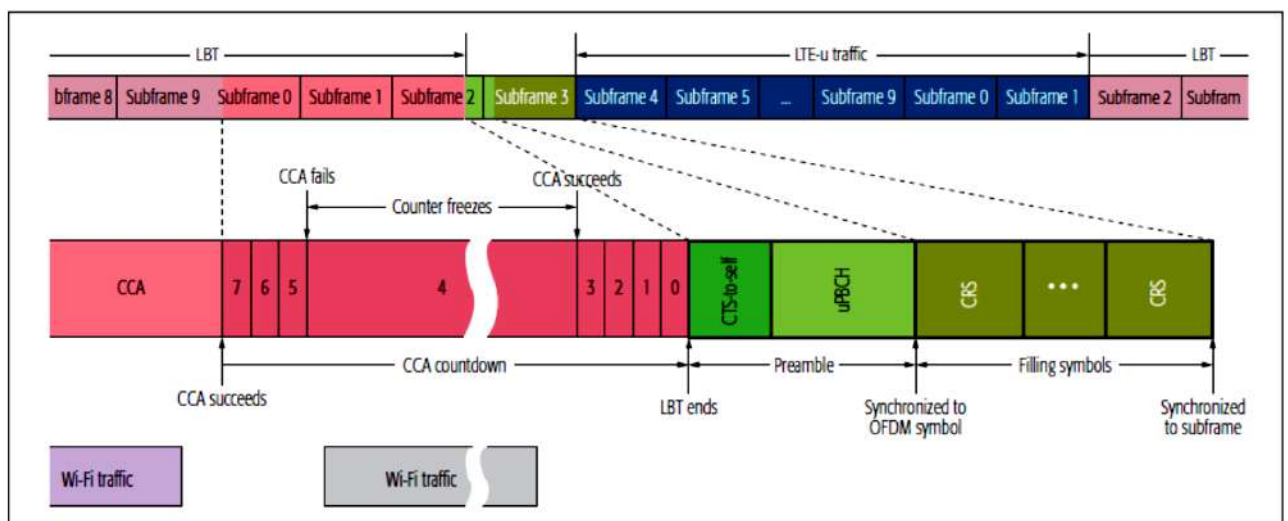


Figure 19 Implémentation de LBT basé-charge sur structure LTE basé-trame, préambule chevauche sur deux sous-trames

génération, et donc le temps d'accès au support tel qu'indiqué dans le CTS-to-self sera honoré par un système WiFi, permettant ainsi une meilleure protection contre les transmissions WiFi. Comme un système LTE-u honore également les signaux WiFi pendant la LBT, la protection naturellement fonctionne dans les deux sens, assurant une coexistence plus harmonieuse entre les systèmes LTE-u et WiFi.

Il convient de noter qu'un LBT réussi ne garantit le droit d'utiliser que les 10 ms suivantes du temps du medium, c'est-à-dire neuf (ou huit) sous-trames de temps de canal après déduction du temps

consommé par le préambule et la synchronisation. Une cellule doit renoncer à l'utilisation du canal dès que la durée s'écoule, et d'entrer en compétition à nouveau pour l'utilisation des 10 ms de temps.

Les approches présentées dans cette section, se voient opposer les réserves signalées à propos de l'exploitation du spectre sans-licence. De plus, on peut remarquer que l'intégration entre les réseaux impliqués est forte et ne supporte que deux tiers. Par conséquent, le support de plusieurs réseaux de TARs différentes imposera trop de contraintes pour que le fonctionnement soit souple et performant, à cause du poids de la coordination et de la coexistence. Il est très difficile d'assurer la coexistence par une coordination directe entre des réseaux cellulaires hétérogènes, en raison de l'incompatibilité des interfaces MAC/PHY des réseaux coexistant, des problèmes de conflit d'intérêts, ainsi que de la vie privée des clients [48].

## 1.9 Réseaux Multi-Radio Hétérogènes Convergeants

La convergence des techniques hétérogènes d'accès sans fil hétérogènes est l'une des solutions clés pour les réseaux mobiles futurs. Dans les réseaux mobiles convergents, les utilisateurs accèdent à de nombreux types de services mobiles, malgré leur emplacement, leur type de connexion et leur appareil. Le réseau mobile convergent permet aux utilisateurs d'utiliser efficacement les multiples émetteurs/récepteurs fonctionnant dans des normes telles que LTE-Advanced (LTE-A), Wi-Fi, Bluetooth, et Zig-Bee. Par exemple, les utilisateurs peuvent être réaffectés entre différents types de réseaux (LTE, LAN, Wi-Fi, ZigBee, etc.) sans interruption de session, ou même utiliser simultanément les ressources de différents réseaux [49].

Dans [3], il est noté que même avec une allocation additionnelle de spectre, ces fréquences ajoutées resteraient vraisemblablement fragmentées et pourraient nécessiter diverses techniques de transmission. Par conséquent, il y a une demande pressante pour mobiliser davantage de capacité à

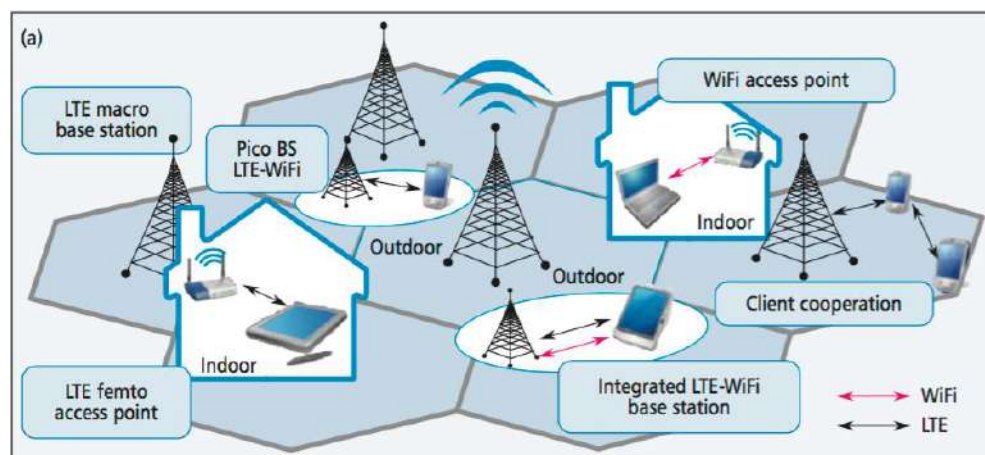


Figure 20 Topologie d'un réseau multi radio convergent

travers des technologies d'accès radio (TARs) multiples. Il devient crucial d'agréger différentes technologies radio dans le cadre d'un réseau radio convergent commun, de manière transparente à l'utilisateur final, et de développer des techniques qui peuvent utiliser efficacement les ressources radio disponibles à travers des bandes de spectre différentes en utilisant, éventuellement, des TARs variées.

Comme les tailles des cellules se rétrécissent, les empreintes des réseaux cellulaires, locaux, et d'espaces personnels se recouvrent de manière croissante [3]. Ceci crée une opportunité attirante pour utiliser simultanément multiple TARs pour améliorer la connectivité. Le couplage intelligent de TAR-multiples va augmenter les performances à travers les dimensions spatiales, temporelles, fréquentielles et autres. La Figure.20, illustre une vision d'un réseau d'opérateur hétérogène multi-TAR. Elle présente un déploiement hiérarchique d'une macro-cellule de large zone pour une omniprésente couverture, connectivité, et mobilité sans faille ; à laquelle vient s'ajouter une couche de plus petites cellules à basse puissance (picos, femtos, points d'accès WiFi, des modules WiFi-LTE intégrés, etc.) pour améliorer la capacité en rapprochant l'infrastructure des utilisateurs dans les zones où la demande de trafic est importante.

### 1.9.1 Stations Multi-Radio

Dans [50], on part du constat que, bien que nous soyons souvent entourés d'une abondante capacité sans fil, presque tout nous est inaccessible. On propose, alors, de munir les appareils mobiles de multiples interfaces radio, capables de se connecter à plusieurs réseaux, en même temps. Les appareils mobiles doivent être assez "intelligents" pour scruter le voisinage pour trouver les meilleurs réseaux radio, et de choisir vers quel(s) réseau(x) se connecter pour répondre au mieux aux besoins de l'utilisateur mobile. Les flots de données sur les différentes connections sont assemblés, avant d'être présentés à l'application sur l'appareil mobile, ce qui rend les connexions plus rapides. Cette proposition rencontre trois limitations : (1) Un flot orienté-connexion en cours, comme TCP, ne peut pas être facilement passé à une nouvelle interface, sans rétablissement d'état ; (2) Si des interfaces réseaux multiples sont disponibles, une application ne peut pas en profiter pour avoir un débit plus haut ; au mieux, elle peut utiliser la connexion la plus rapide ; (3) L'utilisateur ne peut pas choisir facilement et dynamiquement les interfaces avec une granularité assez fine pour minimiser les pertes, délais, consommation de puissance, ou les charges d'utilisation.

### 1.9.2 Le Framework ORCHESTRA

Dans [51], un framework dénommé ORCHESTRA est proposé pour gérer les différents équipements dans un réseau sans fil hétérogène. Au lieu que la connectivité soit gérée sur la base d'une interface ;

cela signifie il n'y a qu'une seule interface active, et que le changement d'interface entraîne une perte de connexion, ce problème est résolu en introduisant une couche virtuelle (VMAC) et en faisant abstraction de la connectivité de l'utilisateur et des applications. Cela permet également

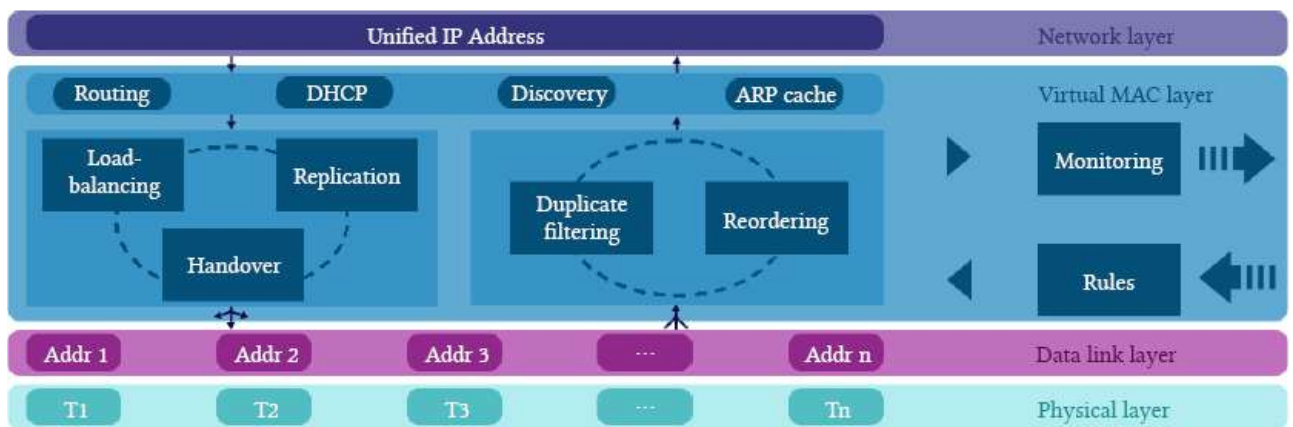


Figure 21 La couche virtuelle ORCHESTRA se trouve au-dessus de la couche de liaison de données et agit elle-même comme une couche de liaison de données vers la couche réseau.

d'implémenter une solution qui fonctionne sur plusieurs technologies. L'implémentation du VMAC est située au-dessus des couches de liaison de données existantes et en dessous de la couche réseau dans le modèle OSI, comme le montre la Figure.21. Les couches existantes ne sont donc pas modifiées et les paquets continuent de les traverser. La couche virtuelle utilise uniquement la fonctionnalité représentée pour organiser les différentes couches MAC et faire croire à la couche réseau qu'une seule interface, la VMAC, est présente. Par conséquent, seule une adresse IP unique et unifiée est nécessaire, tandis qu'une adresse MAC virtuelle unique n'est pas nécessaire. La couche liaison de données n'a aucune connaissance du VMAC et se comporte comme dans une pile réseau normale, en transmettant les paquets entrants vers le haut. Ceux-ci passent ensuite par le VMAC, sont filtrés ou ordonnés, et sont ensuite transmis à la couche réseau. De la même manière, un paquet sortant est transmis de la couche réseau vers le VMAC où des fonctionnalités telles que l'équilibrage de charge ou la duplication sont appliquées, et est ensuite transmis à la bonne interface au bon moment. Contrairement aux solutions existantes, cette approche est basée sur les paquets et non sur les flux. Cela signifie que, par exemple, l'équilibrage de la charge peut se faire au niveau des paquets et non au niveau du flux, ce qui permet plus de flexibilité et de performance, surtout si un flux consomme toute la bande passante disponible. d'une technologie. Le VMAC est configuré par le biais de messages provenant du contrôleur, qui comprennent des règles définissant comment chaque type de paquet est traité et par quelles technologies il est envoyé. Ces règles peuvent, par exemple, être fondées sur les adresses IP de source et de destination, le port, le type de protocole de transport, les numéros de séquence, etc. Elles indiquent également les pondérations pour chaque interface dans le

cas de l'équilibrage de la charge. Tous les paquets qui passent sont surveillés et regroupés en statistiques pour chaque technologie, puis transmis au contrôleur via le module de surveillance.

Cette solution tente de gérer l'hétérogénéité des interfaces radio, cependant elle repose non pas sur un réseau cœur traditionnel mais sur l'utilisation du concept de "Software Defined Networks". Les réseaux sans fil à intégrer doivent donc être modifiés pour s'adapter à ce nouveau concept. De même, cette approche ne n'adresse pas au problème de la sous-utilisation du spectre dans le réseau sans fil hétérogène qu'elle gère, puisqu'elle masque l'hétérogénéité des interfaces radio tout en maintenant un fonctionnement traditionnel.

### 1.9.3 Architecture Basée sur le Cloud pour l'Internet de Dispositifs de Spectre

Dans l'article [52], introduit le concept d'Internet de dispositifs du spectre (IoSD) en mettant en réseau des dispositifs de surveillance et d'utilisation du spectre pour un partage du spectre hautement intelligent dans les futurs réseaux sans fil. Une architecture basée sur le nuage est développée pour la réalisation de l'IoSD, où un nuage de spectre avec trois techniques habilitantes clés, notamment l'analyse des données du spectre, l'optimisation hiérarchique des ressources du spectre et l'évaluation des services de spectre basées sur la QoE est systématiquement analysée.

Les dispositifs du spectre peuvent être regroupés en deux classes : i) dispositifs de contrôle du spectre (SMD) et dispositifs d'utilisation du spectre (SUD). Les SMD sont chargés de surveiller ou de détecter l'état des différentes bandes du spectre, tandis que les SUD utilisent le spectre comme support pour transmettre des données.

Comme le montre la Figure.22, une architecture basée sur le cloud est développée pour permettre un IoSD sur les futurs réseaux sans fil. Au centre des architectures, les nuages de spectre servent de pont entre les SMD et les SUD. Plus précisément, les nuages de spectre rassemblent les informations de surveillance du spectre provenant de divers SMDs (y compris des analyseurs de spectre spécialisés et dédiés et des capteurs de spectre personnels / de foule) et distribuent les commandes de contrôle cognitif aux SUDs (c'est-à-dire des décisions de programmation du spectre et/ou de contrôle de la puissance). Dans le sens inverse, les demandes de spectre et la QoE des SUD sont transmises aux nuages de spectre pour un ajustement adaptatif en boucle fermée, et les nuages de spectre réagissent à la requête de surveillance aux SUDs.

Cette approche dépend grandement de la qualité des dispositifs de spectre et de leurs techniques pour la détection de spectre pour garantir une bonne connaissance de l'état du spectre à tout moment. Nous avons là, aussi, un changement de concept de réseau auquel les réseaux traditionnels doivent s'adapter.

Se pose aussi la question de la réactivité de cette infrastructure lourde aux fluctuations rapides de la disponibilité du spectre, de même que l'échelle de temps à laquelle cette architecture est capable de fonctionner. La question de la coexistence avec d'autres réseaux n'est pas aussi abordée, bien qu'elle constitue un facteur de dysfonctionnement important.

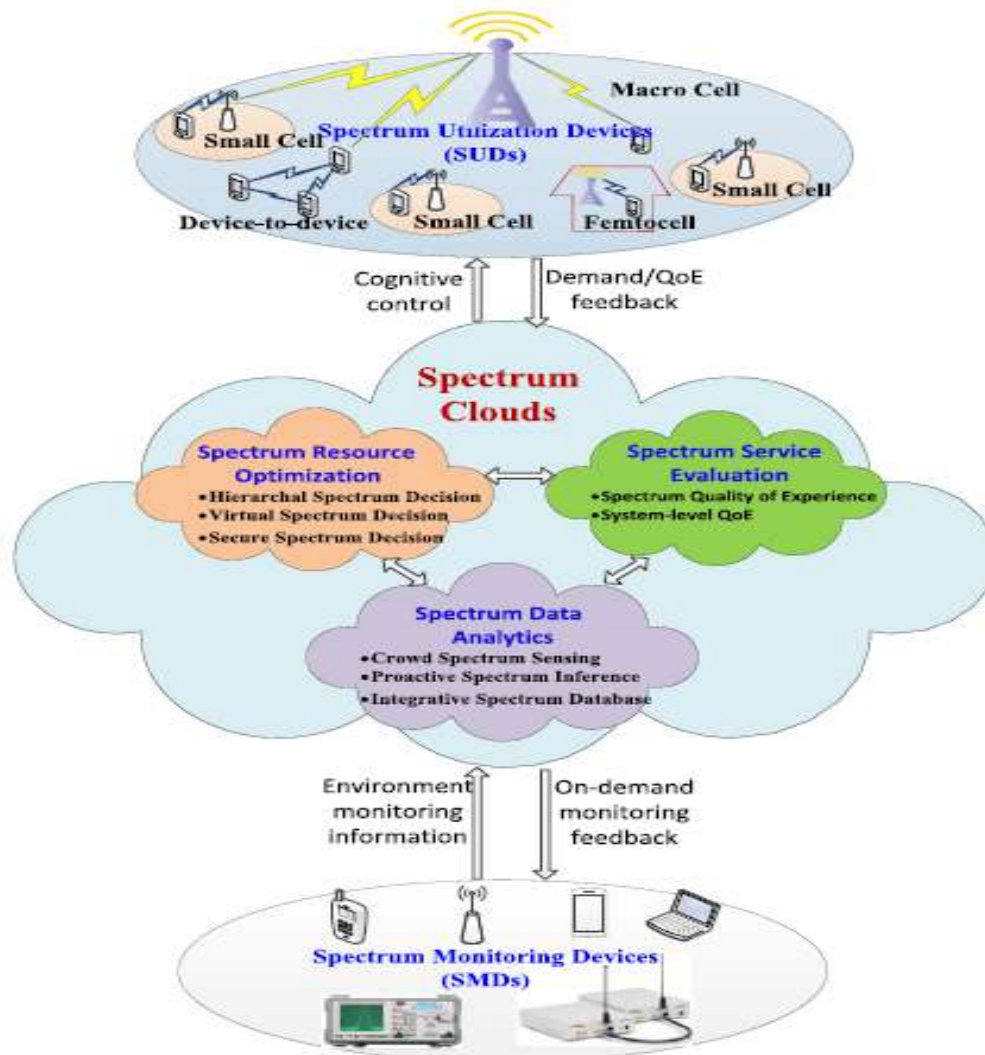


Figure 22 Architecture de nuage de spectre pour un Internet des dispositifs de Spectre (IoSD) sur les futurs réseaux sans fil.

#### 1.9.4 Systèmes Cognitifs Dynamiques (SCD)

Dans [53], les auteurs considèrent l'intégration de deux entités, à savoir la gestion dynamique du spectre (GDS) d'une part et un système dynamique cognitif (CDS) d'autre part. Pour être plus précis, le SCD assume le rôle d'un moteur cognitif au cœur des communications sans fil, à l'image du cerveau vu comme un réseau complexe, dont la structure est très organisée avec, d'un côté, le percepteur de l'environnement et, de l'autre, l'exécutif, où le contrôle cognitif joue un rôle clé. GDS permet la coexistence de divers types de paradigmes d'utilisation du spectre : l'utilisation exclusive dans les

réseaux cellulaires traditionnels, représentés par LSA, LTE-U/LAA, et l'accès opportuniste au spectre primaire-secondaire, Figure.23.

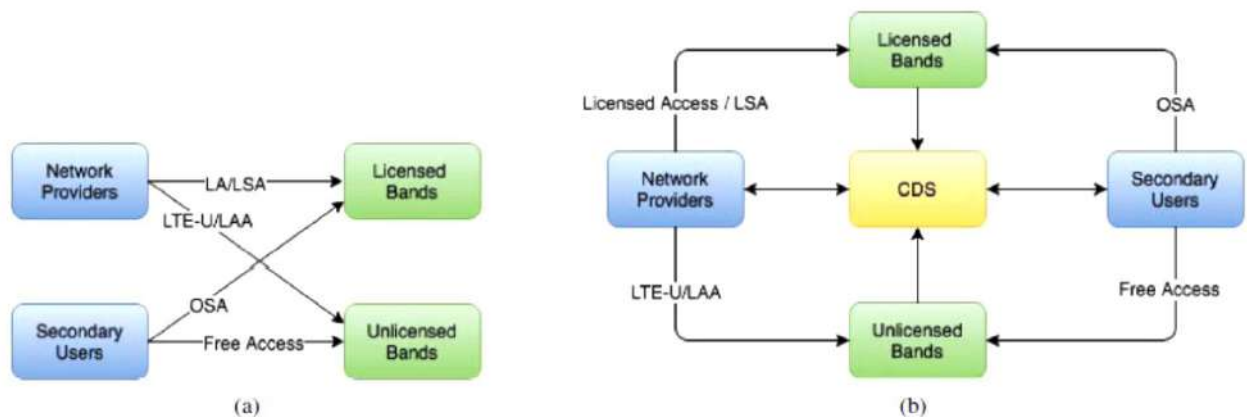


Figure 23 a) Description du partage de spectre sous forme maillée pour réseaux sans fil futurs ; b) système cognitif dynamique au centre de la gestion dynamique de spectre dans les réseaux de communications sans fil complexes

## Architecture du SCD

Comme illustré sur la Figure.24, le fonctionnement et les composants du SCD sont donnés comme suit :

### *Le cycle perception-action :*

En exploitant la rétroaction globale sous-jacente du cycle de perception-action, l'extraction d'informations par le perceuteur est successivement améliorée d'un cycle à l'autre ; par conséquent, la fonction du cycle de perception-action est le gain d'informations. La SCD se caractérise par un flux d'informations dirigé, allant du perceuteur vers l'exécutif de manière cyclique et continue.

### *Le perceuteur :*

Comme son nom l'indique, l'objectif sous-jacent de la mémoire dans le perceuteur est la perception de l'environnement. À cette fin, nous constatons généralement que le perceuteur est constitué de deux parties. La première partie est basée sur la modélisation des éléments observables de l'environnement. La seconde partie est la carte des interférences dynamique.

### *Le canal de retour d'information*

Comme mentionné précédemment, le canal de retour relie l'exécutif au perceuteur, complétant ainsi le cycle perception-action. Pour que le SCD puisse agir comme un moteur de réseaux de communication sans fil complexes, le canal est équipé de trois entités spécifiques :

(i) La puissance d'interférence est mesurée en termes de métriques quantifiées, de manière linéaire ou non linéaire selon l'application concernée.

- (ii) Il doit y avoir un seuil qui sépare le positif (c'est-à-dire il doit y avoir un seuil qui sépare les mesures positives (c'est-à-dire acceptables) des mesures négatives (c'est-à-dire inacceptables).
- (iii) Pour le partage du spectre comme objectif, les métriques négatives doivent être sanctionnées en interne sur une base cyclique ; la sanction est une façon plus simple de se référer aux récompenses négatives internes.

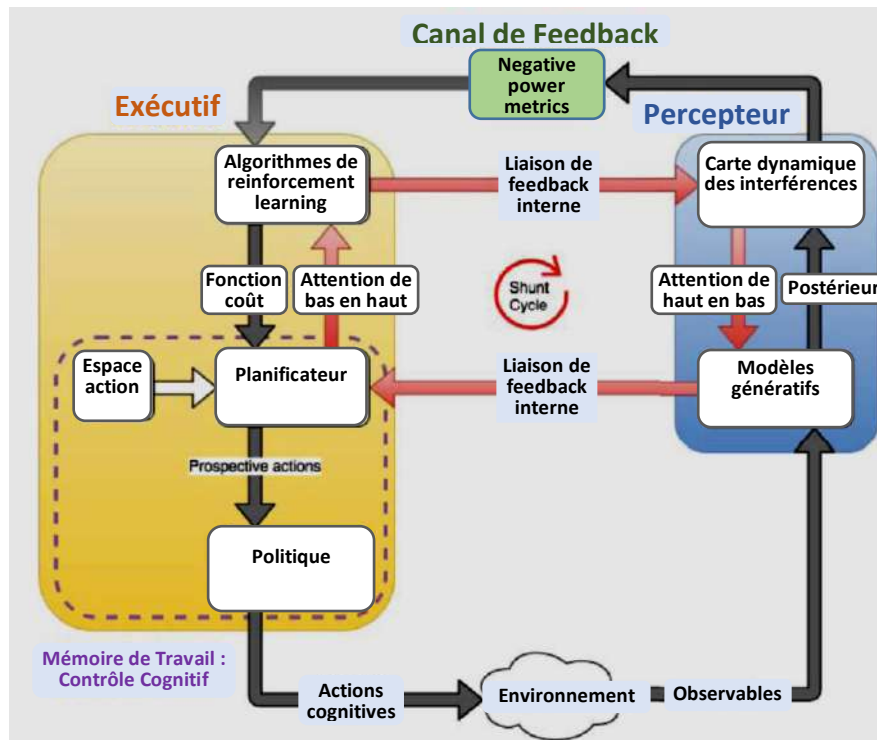


Figure 24 Diagramme de blocs du CDS

### L'exécutif :

L'exécutif se compose de deux éléments fonctionnels : l'apprentissage par renforcement et le contrôleur cognitif.

- i. Algorithme de renforcement de l'apprentissage : La fonction de l'apprentissage par renforcement est principalement influencée par les variations d'interférence d'un cycle de perception-action à l'autre.
- ii. Contrôle cognitif : Comme le cycle perception-action fonctionne cycle par cycle, le contrôleur cognitif est confronté à un compromis difficile : soit mettre à jour la fonction "cost-to-go" basée sur l'algorithme d'apprentissage par renforcement, soit mettre à jour l'action cognitive optimale sur l'environnement en raison de la politique susmentionnée. Le compromis est résolu en formulant un problème d'optimisation, qui porte sur deux choix contradictoires.

Le contrôleur cognitif se compose de deux éléments : la planification, suivie par la politique, qui comprend également la prise de décision pour des actions optimales sur l'environnement.

Les remarques faites à propos de l'approche de la section précédentes sont aussi applicables à la présente approche.

## 1.10 Conclusion

Les approches que nous venons de présenter ne manquent pas d'ingéniosité. Cependant, elles ne conviennent pas aux lignes directrices que nous nous sommes imposé quant à l'architecture du réseau sans fil hétérogène que nous voulons construire (voir introduction). En effet, ces approches dévient de ces lignes directrices de l'une (ou plusieurs) des manières suivantes :

- Impliquer un couplage fort entre les architectures des différents réseaux à intégrer, ce qui empêche la flexibilité et l'extension.
- Nécessiter un réseau intégrateur de nouvelle génération dont on ne connaît pas encore tous les détails, puisque les recherches à son propos sont encore en cours.
- Priver les réseaux à intégrer de la complète responsabilité de la gestion de leurs spectres.
- Modifier les réseaux à intégrer pour les adapter aux nouvelles approches, ce qui implique un coût en termes de performances surtout lorsque les changements sont importants ou que les réseaux en question n'y sont préparés.
- Utiliser des techniques de la RC, mais dont les performances sont discutables, comme par exemple l'utilisation de la LBT pour le captage de spectre qui gaspille un temps précieux ou la mobilité du spectre.
- Nécessiter des solutions pour la coexistence, entre réseaux différents, dont l'efficacité n'est pas garantie dans les milieux urbains denses.
- Abandonner le régime des licences qui, pourtant, offre la prédictibilité de la disponibilité des ressources radio, et permet d'adopter la TAR adéquate.
- L'exploitation du spectre sous-utilisé se fait à une échelle de temps assez grande pour tenir compte des opérations assez lourdes de constitution d'une carte du spectre disponible ou pour les boucles de feedback nécessaire pour s'adapter aux fluctuations du spectre.

---

## CHAPITRE 2

# ARCHITECTURE ET SCHEMAS PROTOCOLAIRES DANS I-CRICNet

---

L'architecture d'I-CRICNet a été conçue dans le cadre des principes directeurs discutés en introduction. Sa fonction première est d'exploiter (de manière intégrée) les ressources radio " oisives " de l'environnement dans lequel elle est implantée. Par ressources " oisives " (que nous appellerons dans la suite " *Opportunités Spectre-Radio* " OSRs), nous entendons le spectre radio qui est sous-utilisé ou momentanément inutilisé dans les différents réseaux sans fil constituant l'environnement radio. Ce dernier est caractérisé par sa nature particulièrement *dynamique, répartie, et hétérogène*. Le dynamisme exige de l'*agilité*, de la part des composants de l'architecture, la répartition appelle la *coopération* entre ces composants, alors que l'hétérogénéité nécessite un mécanisme d'*uniformisation*. L'exploitation intégrée des OSRs passe par leurs *collecte* dès qu'elles se présentent, leurs *libération* lorsqu'elles sont réclamées, et leurs *partagent*, pour les communications, tant qu'elles sont disponibles. Précisons, que par collecte et libération nous entendons une sorte de synchronisation par laquelle tous les intervenants s'accordent sur l'état des OSRs disponibles, à chaque instant.

Dans ce chapitre, nous allons passer en revue nos choix de conception architecturale et protocolaire sous-tendant la mise en œuvre des fonctions de collecte et de libération des OSRs ainsi que la mobilité du spectre au sein d'I-CRICNet. A cet effet, nous traiterons successivement des points suivants :

1. L'hétérogénéité des OSRs et leur uniformisation.
2. Les différents composants (acteurs) de l'architecture ainsi que leurs rôles respectifs.
3. Les divers scénarios d'intervention de cette architecture.
4. La migration du spectre
5. La mise en œuvre globale des fonctions de collecte et de libération des OSRs.

## 6. Les protocoles sous-tendant la mise en œuvre des fonctions de collecte et de libération.

### 2.1 Les OSRs dans les réseaux hétérogènes

L'hétérogénéité des technologies d'accès radio (TARs) dans les réseaux hétérogènes sans fil (RHSF) a un impact direct sur les caractéristiques des OSRs correspondantes, en ce sens que, ce qui caractérise complètement les OSRs s'avère dépendre de la TAR particulière du réseau dans lequel ces OSRs se produisent. La caractérisation des OSRs peut être, cependant, réduite au strict nécessaire sous réserve de mettre à contribution les informations relatives au contexte de chaque réseau sans fil individuel. Pour illustrer nos propos, nous allons examiner quatre TARs largement utilisées dans les réseaux sans fils traditionnels (2G/3G/4G and Wi-Fi), et ferons ressortir, dans chaque cas, ce qui est essentiel pour identifier les OSRs. Cela inclut la *nature* des OSRs (c.à.d. ce qui peut être considéré comme telles), la prédictibilité de leurs *durées*, et le *motif général* selon lequel elles se produisent (dans une bande de spectre particulière).

**TDMA.** Dans cette technique d'accès, toute la bande de fréquences de la voie montante/descendante est partagée parmi plusieurs utilisateurs en allouant, à chacun, un laps de temps (time-slot) choisis parmi un nombre prédéfini de lapses de temps fixes (fixed-time slots). Ce qui est considéré comme OSR, dans ce cas, est un trou dans toute la bande de fréquence montante/descendante (spectrum hole) qui dure pendant un ou plusieurs time-slots. En termes de prédictibilité de la durée d'une OSR, on

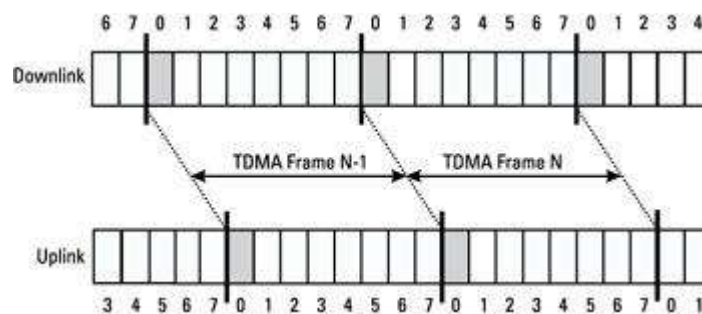


Figure 25 OSRs dans réseaux TDMA

peut être sûr que lorsqu'elle se produit, une OSR ne peut pas durer au-delà du laps de temps (time-slot) durant lequel elle a été signalée, mais peut se reproduire, sauf mention contraire, après un nombre prédictible de time-slots (nombre total de time-slot d'une trame - 1), Figure.25. Le motif général selon lequel les OSRs se produisent dans ce cas est une séquence irrégulière de trous dans le spectre, s'étalant chacun sur toute la bande de fréquence montant/descendante (canal).

*Pour identifier complètement une OSR, dans ce cas, tout ce dont on a besoin sont les instants de début et de fin de cette opportunité. Le contexte fournit des morceaux d'informations additionnels pour reconstruire l'image globale.*

**CDMA.** Cette technique d'accès est basée sur la transmission par étalement de spectre (spread spectrum transmission), qui nécessite l'utilisation de codes d'étalement pour étaler le signal sur une bande de fréquence plus large que ce qu'il aurait été normalement nécessaire. Plusieurs utilisateurs peuvent accéder simultanément à toute la bande de fréquence, sans interférences mutuelles nuisibles. Les réseaux sans fils utilisant cette technique d'accès sont dits à "interférence limitée" (interference limited), ce qui signifie que lorsque le nombre d'utilisateurs augmente les niveaux d'interférence peuvent augmenter au point de dégrader profondément les performances. Ce qui est considéré comme OSR, ici, est de nature différente, puisque lorsque certains utilisateurs cessent de transmettre d'autres continueront à transmettre et, donc, aucun trou dans le spectre (spectrum hole) n'est créé. Cependant, il y a un phénomène positif qui se produit, celui de la diminution du niveau d'interférence globale. On peut donc continuer de parler OSR puisque des transmissions opportunistes peuvent être effectuées pourvu qu'elles maintiennent les interférences, qu'elles engendrent, à un niveau tolérable par les utilisateurs natifs du réseau sans fil primaire. Ces OSRs durent aussi longtemps que le niveau d'interférence globale reste tolérable, donnant un bon degré de prédictibilité de la durée de ces OSRs. Le motif général, ici, des OSRs suit une forme en vagues qui dépend des fluctuations des interférences ambiantes.

*Pour identifier l'occurrence de OSRs, dans ce contexte, nous devons donner des indications sur l'évolution du niveau d'interférence ; en particulier, est-ce qu'il a atteint le seuil de tolérance, pas encore, augmenté, ou diminué ?*

**OFDMA.** Dans cette technique toute la bande de fréquences est divisée en un ensemble de plusieurs sous-porteuses (subcarriers), et le temps est partitionné en une séquence de trames s'étendant, chacune, sur un nombre prédéfini de lapses de temps fixes (fixed-time slots). Grosso modo, chaque utilisateur se voit allouer un sous-ensemble de ces sous-porteuses, dans une trame, pour un nombre donné de time-slots (ressource canal). Ce qui constitue une OSR, dans ce cas, est le trou dans le spectre créé par l'absence de transmission dans le canal utilisateur de la trame courante. Le trou dans le spectre s'étale sur un sous-ensemble de sous-porteuses, seulement, et dure un nombre donné de fixed-time slots. L'extinction de l'OSR est dictée par la manière dont l'ordonnanceur (scheduler) alloue les canaux aux utilisateurs. En effet, le changement de place d'un canal utilisateur d'une trame à la suivante, ou au contraire sa stationnarité, déterminent si une OSR dans ce canal utilisateur peut ou non survivre à la fin de la trame courante et se renouveler dans la trame suivante. En tout état de

cause, cependant, une OSR dans un canal utilisateur est automatiquement suspendue dès que les ressources allouées à ce canal, dans la trame courante, sont consommées. Enfin, le motif général des occurrences des OSRs présente un aspect dispersé, dans chaque trame, avec une forme en partie non prédictible.

*L'identification d'une OSR dans ce contexte est plus complexe, vu que d'une part, nous devons identifier les sous-porteuses impliquées par l'OSR et, d'autre part, signaler les temps de début et de fin de cette OSR.*

**CSMA/CA.** Avec cette technique, les utilisateurs entrent en compétition pour l'accès à la bande radio tant qu'il n'y a pas de gagnant. Le gagnant commence à transmettre en utilisant toute la bande de fréquences. Le reste des utilisateurs doivent attendre la fin de la transmission en cours, en écoutant le canal, avant d'entrer dans un nouveau cycle de compétition. Dans ce cas, on peut considérer une OSR comme une période durant laquelle il y a un degré de compétition, pour l'accès à la bande radio, qui soit faible jusqu'à modéré. L'analogie avec le cas CDMA est qu'au lieu de la dépendance vis-à-vis du niveau d'interférence, les OSRs dans ce cas sont dépendante du degré de compétition (ou activité). Par suite, les OSRs durent aussi longtemps que la compétition reste tolérable, donnant un bon degré de prédictibilité de leurs durées. Le motif général d'occurrence des OSRs suit une forme en vagues qui dépend du degré de compétition ambiant.

*Par analogie avec le cas CDMA, pour reconnaître l'occurrence d'OSRs, dans ce contexte, nous devons donner des indications sur l'évolution du niveau de compétition ambiant, en particulier, est-ce qu'il a atteint le seuil de tolérance, pas encore, augmenté, ou diminué ?*

## 2.2 Restructuration du spectre dans I-CRICNet

De ce qui précède, il ressort qu'il est impératif d'uniformiser l'univers des diverses OSRs mentionnées ci-dessus si on veut être capable de concevoir des schémas génériques capables d'opérer, de manière efficace, dans des environnements de RSFHs. Pour paver la voie à cette uniformisation nous devons, dans une première étape, nous décider quant à une TAR adéquate. La technologie OFDM, ou plus précisément la technologie OFDM non-contigüe (NC-OFDM), était un choix naturel vue la flexibilité qu'elle offre pour transmettre sur des portions-de-spectre non contigües (nombre variable de sous-porteuses), désactivant de manière adaptative (nulling) certaines sous-porteuses tout en utilisant d'autres, et l'aptitude à contrôler la puissance de transmission dans chaque portion. En d'autres termes, la technologie choisie a les ingrédients nécessaires pour contrôler les trois dimensions des OSRs, à savoir le temps, la fréquence, et la puissance.

La technologie NC-OFDM a été considérée comme une candidate prometteuse pour les systèmes à base de radio cognitive. Dans [54], par exemple, il est mentionné que, dans un système cognitif basé sur NC-OFDM/OQAM, les sous-porteuses qui sont dans le spectre d'un PU peuvent être désactivées lorsque le PU est détecté, pour éviter d'interférer avec ce dernier. De plus, les SUs peuvent utiliser les sous-porteuses de la bande de spectre vacante pour la transmission des données.

Dans [3], les auteurs objectent à cette technologie la difficulté de l'appliquer, simultanément, dans des segments de spectre avec des caractéristiques différentes et penchent plutôt en faveur de l'agrégation de porteuse (carrier aggregation CA), une autre technologie qui permet l'usage de segments de spectre multiples [55]. Dans notre proposition, cependant, cette objection n'est pas un souci, puisqu'au lieu de communiquer, en même temps, sur des bandes multiples et hétérogènes les SUs commutent d'une bande à une autre, communiquant ainsi sur une seule bande à la fois (BOA). Ce dernier choix donne l'opportunité de s'adapter aux caractéristiques individuelles de chaque bande de spectre.

L'adoption de la NC-OFDM comme TAR dans notre réseau cellulaire intégrateur impose de restructurer en conséquence la BOA avant son utilisation, pour satisfaire les besoins techniques, et permettre l'exploitation du spectre dans l'esprit de la technologie NC-OFDM. Par conséquent, lorsqu'on parle de restructuration du spectre cela signifie que quelle que soit la TAR originale utilisées par les PUs pour accéder à la BOA elle est considérée, au niveau de la SBC, comme étant divisée en un nombre paramétrique de sous-porteuses et structurée en trames d'une durée paramétrique. Des communications opportunistes peuvent, alors, se dérouler dans les portions du spectre déclarées comme *libres*. Ainsi, l'avantage que nous en tirons est double : les communications en mode secondaire sont effectuées en une seule TAR (NC-OFDMA), et toutes les OSRs (dans ce même mode) sont traitées de manière uniforme malgré leur hétérogénéité. D'autres avantages tirés de ce choix seront détaillés au moment opportun.

## 2.3 Architecture du réseau I-CRICNet

Dans l'architecture proposée [56], nous distinguons les principales catégories d'acteurs suivantes (Figure.26) :

- **Station de Base Primaire (SBP)** : Une station de base de l'un des réseaux sans fil primaires que l'on veut intégrer, et qui se recouvrent les uns les autres dans (particulièrement) les zones urbaines denses. Les communications sans fil à l'intérieur de la zone de couverture d'une SBP s'effectuent avec la technologie d'accès du réseau sans fil correspondant, et dans sa bande de spectre particulière (pour laquelle il détient

une licence). Le contrôleur de chaque SBP est colocataire avec un micro-serveur de bord (Edge micro-server).

- **Station de Base/eNode Cognitive (SBC) :** Une station de base (ou eNode) contrôlant une cellule correspond à une zone où viennent se recouvrir différentes cellules primaires, de TARs et de bandes de spectre différentes. Les communications sans fil avec de telles SBCs sont effectuées de manière opportunistes et se déroulent dans la bande de spectre (sous licence) de l'une des cellules primaires qui se recouvrent dans la zone en question. Cependant, les communications avec toutes les SBCs se font dans une TAR spécifique, à savoir, la technologie NC-OFDMA. Les SBCs communiquent dans une seule bande (sous licence) à la fois et doivent être capables de commuter d'une bande à une autre de manière agile.

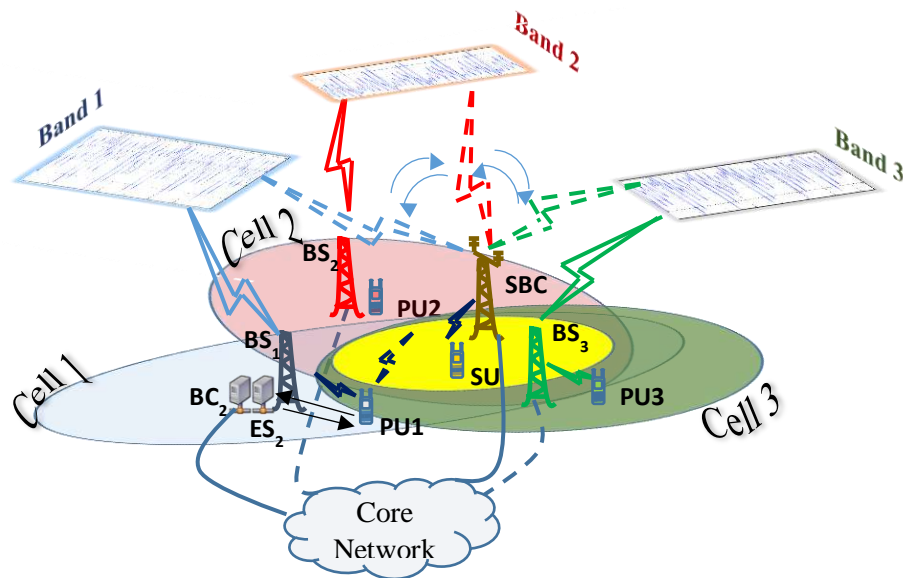


Figure 26 Architecture du réseau I-CRICNet

- **Micro-Serveur de Bord (MSB) :** Un micro serveur (physique ou logique) au fait du contexte, colocataire avec une SBP hôte, dont le rôle est de collecter en temps réel des informations sur le réseau d'accès radio (RAR) à cette SBP particulière. Ces informations sont destinées aux utilisateurs et aux SBCs et incluent la charge du réseau primaire, les conditions radio, le nombre d'utilisateurs primaires, leurs degrés d'activité, etc... La SBC utilise ces informations pour construire une liste de bandes de spectre alternatives vers lesquelles elle pourrait migrer au cas où la bande de spectre actuelle de communication devient surchargée ou bien que les conditions radio ne soient plus favorables. Le MSB peut demander aux utilisateurs de collecter des informations ou les instruire d'exécuter des tâches ou adopter des comportements spécifiques. D'autres fonctions du MSB seront exposées plus loin.

- **Équipement Utilisateur (EU)** : Un équipement utilisateur double-mode double-interface avec antennes séparées. Dans le mode primaire, l'utilisateur communique avec une SBP du réseau sans fil correspondant à la TAR de son interface primaire, et agit alors en tant qu'utilisateur primaire (UP). Dans le mode secondaire, l'utilisateur communique avec une SBC à travers son interface secondaire, en utilisant la technologie NC-OFDMA, et se converti en un utilisateur secondaire (US). Il faut signaler ici, l'existence de communications en arrière-plan vitales, pour le fonctionnement de tout le réseau, entre les EUs et le MSB colocataire de la SB qui les contrôle. Un UP qui se trouverait dans la zone de couverture d'une SBC pourra effectuer un "handoff" et devenir un US. A l'inverse, un US qui se trouverait dans la zone de couverture d'un réseau primaire pourra redevenir un UP, pourvu bien sûr qu'il ait l'interface de la TAR appropriée.

## 2.4 Schéma opératoire intégré pour la collecte du spectre

Pour que I-CRICNet puisse fonctionner (opérer) dans un environnement hétérogène tel que décrit ci-dessus, des questions clé relatives au compte rendu, l'identification, la détection, et le partage (ou allocation) des OSRs doivent être considérées. Dans cette section, nous allons présenter une vue d'ensemble (qui est la nôtre, et que nous détaillerons plus loin), illustrant comment toutes ces fonctions pourraient être conçues et réalisées de manière intégrée et transparente (par rapport aux réseaux sans fil primaires).

Nous adoptons, dans I-CRICNet, un schéma opératoire centralisé selon lequel la SBC doit d'abord décider de la bande de spectre (sous licence) qui supportera les communications opportunistes avec les USs qui lui sont attachés. La sélection de la bande (sous licence) opérationnelle actuelle (BOA) est basée sur des rapports, en tâche de fond, en provenance des MSBs. En effet, dans notre proposition les MSBs sont colocataires avec les SBPs et, à ce titre, sont au fait en temps-réel des conditions du réseau d'accès radio (RAR) qui prévalent dans la cellule couverte par la SBP hôte. La question de changer une BOA adopté est examinée lorsque les rapports sur les conditions actuelles du RAR de la cellule courante ne sont plus favorables. La SBC procède donc à la migration de ses communications vers une nouvelle bande (sous licence), choisie parmi une liste de bandes candidates (sous licence), et instruit les USs qui lui sont attachés d'en faire autant. La construction et la mise à jour de la liste des bandes candidates sont alimentées par des rapports périodiques communiqués par les MSBs. Ce genre de processus migratoire, d'une bande à une autre, doit être assez agile pour assurer la continuité de service, préserver la transparence, et prévenir la dégradation des performances.

Les communications centralisées entre la SBC et ses USs s'effectuent à travers des opportunités dans le spectre radio (OSRs) identifiées dans la BOA. Rappelons que la BOA est choisie pour être la bande primaire où règnent les conditions du RAR les plus appropriées, et en tant que telle va vraisemblablement offrir un bon, sinon le meilleur, volume d'opportunités du spectre. Les OSs en question sont les ressources radio non encore allouées aux UPs, et celles déjà allouées aux UPs mais actuellement inutilisées. Dans notre proposition, c'est le devoir des UPs de signaler les opportunités du spectre à la SBC, comme c'est le devoir de cette dernière de relayer cette information à ses USs du moment. L'identification des OSs est un processus coopératif entre les UPs et les MSBs. Bien que les UPs soient les mieux placés pour identifier les OSRs dans les ressources déjà allouées, ils ne sont pas toujours bien placés pour identifier les ressources non encore allouées. Dans ce dernier cas, les MSBs s'avèrent être plus indiqués pour cette tâche.

Dans les limites de la zone de couverture des SBCs, l'exploitation des OSRs fait appel à des schémas d'accès-multiple (CAMs) qui doivent opérer sous deux contraintes majeures, à savoir, l'hétérogénéité de nature, de ces OSRs, et la fluctuation, dans le temps, de leur volume disponible.

## 2.5 Schéma générique de notification et de détection des OSRs

Dans les solutions inspirées des réseaux-radio cognitifs, scruter l'environnement radio à la recherche de trous spectraux, et faire part des éventuelles trouvailles aux partenaires communicants, pour le partage de ces opportunités du spectre, sont des questions cruciales pour le fonctionnement de tout le système. A cet égard, notre proposition n'est pas une exception et doit donc traiter ces deux questions (détection des OSRs et leur notification aux partenaires). Ce qui mérite d'être mentionné, cependant, est le défi supplémentaire entraîné d'une part, par la diversité des OSRs explicitée dans la section 2.1 et qui caractérise les RSFHs (notre domaine d'application) et, d'autre part, par la restructuration de la BOA qui permet le traitement uniformisé de ces OSRs. Dans ce qui suit, nous allons nous atteler à la présentation des détails du schéma de notification et de détection (R&D) que nous adoptons dans notre proposition.

L'état final du schéma, que nous présentons, est inspiré de [57] et [58]. En fait, un effort additionnel a été fourni pour combiner et adapter les deux travaux afin qu'ils conviennent à notre schéma d'exploitation intégré.

Dans le premier travail, un protocole MAC basé sur le standard 802.11 est considéré (802.11ec encoded control) [57]. Les messages de control de la couche MAC sont essentiels pour l'implémentation de mécanismes tels que la réservation de canal (pour éviter les collisions, au moyen des messages RTS/CTS) et pour accuser réception des données (pour acheminer correctement les données reçues, au moyen des messages ACK), par exemple. L'idée principale est l'emploi des

séquences de symboles corrélées (SCCs), au lieu des messages de contrôle, pour acheminer toutes les informations de contrôle (Figure.27). Les SCCs sont des codes-mots binaires prédéfinis ressemblant à du pseudo-bruit en cela qu'ils retiennent les propriétés statistiques du bruit blanc échantillonné, bien qu'ils soient générés de manière déterministe [57]. Un exemple de SCC est le préambule utilisé dans le standard 802.11 pour la détection de paquets, la synchronisation de symbole, et le réglage des paramètres radio. Avec cette approche, les propriétés de conception fondamentales de la couche MAC changent radicalement. Premièrement, les SCCs sont courtes, réduisant ainsi grandement la durée de leur transmission, alors que les messages de contrôle 802.11 (RTS,CTS, et ACK) ont une assez longue durée parce qu'ils ont jusqu'à cinq champs (adresse de destination, adresse de l'émetteur, durée, control de trame, et le check-sum de la trame). Deuxièmement, les SCCs sont détectées, via la cross-corrélation, au lieu d'être décodés comme les messages de contrôle, ce qui permet une détection fiable même à de faibles valeurs du ratio signal-to-interference-plus-noise (SINR). Troisièmement, la détection est presque instantanée car ni le décodage ni le traitement des messages de contrôle ne sont nécessaires. Quatrièmement, la détection des SCCs est tentée même lors de la réception des données. Cette dernière propriété s'avère d'une grande importance, puisque elle permet à un nœud en cours de réception de données d'un nœud donné, de recevoir en même temps, une SCC signalant qu'il y a un autre nœud qui demande de communiquer. De même, les ACKs peuvent être détectés correctement même si un terminal interférant transmet simultanément des données.

Un petit dictionnaire (ou codebook) de SCCs peut coder, par exemple, les trois messages de contrôle

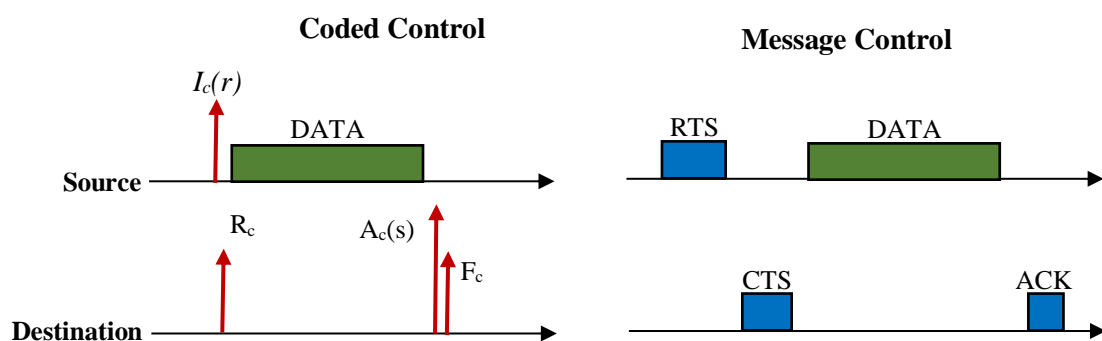


Figure 27 Déroulement chronologique d'un échange de paquet avec un contrôle codé versus un message de control

différents utilisés dans 802.11 pour l'échange de données (RTS, CTS, et ACK). Pour distinguer les utilisateurs les uns des autres, un seul SCC pourrait représenter la combinaison d'un type de contrôle et d'une adresse spécifique. Les SCCs sont encore divisées en SCCs publiques et SCCs privées, selon qu'elles portent des informations d'intérêt pour un destinataire spécifique (ex., accusé de réception), ou qu'elles soient faites pour être entendues par tous les utilisateurs (ex., réservation/libération de canal).

Le second travail propose deux schémas, à base de détection-de-symboles, pour permettre la synchronisation de spectre entre des paires d'utilisateurs secondaires communicants, dans des systèmes RC (radio cognitive) basés sur le NC-OFDM, qui ne nécessite pas de canal de contrôle hors bande, dédié, pour l'échange d'informations de synchronisation de spectre [58]. La synchronisation du spectre, ici, fait référence au mécanisme par lequel les motifs d'utilisation du spectre sont échangés entre les émetteurs et les récepteurs secondaires. Le principal défi, pour le récepteur secondaire, est de savoir comment identifier les sous-canaux que l'émetteur secondaire est entrain de temporairement utiliser, et comment utiliser ces informations pour décoder avec succès les données communiquées de manière opportuniste. L'idée clé dans les deux systèmes est d'utiliser une structure de trame de données consistant en un symbole d'entraînement conducteur suivi de symboles de données réels, et de dériver la probabilité a posteriori (PAP), que chaque sous-canal (sous-porteuse) soit actif, sur la base du seul symbole d'entraînement reçu. Cette PAP est utilisée pour détecter si un sous-canal est actif ou non, et, par conséquent, s'il doit être pris en compte pour la détection de données ou non. La détection de données dans un sous-canal, supposé actif, est basée sur le calcul de métriques de bits pour tous les bits qui correspondent au symbole de données reçu. Un décodeur, alimenté par ces métriques de bits, renvoie ensuite le mot-de-code décodé.

L'attrait de ces schémas réside dans la très courte négociation de réservation, soutenue par une quasi-immunité contre les collisions et la capture par d'autres nœuds. Ils sont également intéressants parce qu'ils sont adaptés aux communications NC-OFDM, sans aucune sorte de canal de contrôle dédié, réalisant, ainsi, des économies précieuses de spectre rare, qui autrement serait nécessaire, pour l'échange d'informations de synchronisation entre les utilisateurs secondaires.

## 2.6 Schéma de notification des OSRs

Dans la présente section, nous allons nous concentrer sur le schéma de notification des événements dans le contexte d'un RSFH. C'est-à-dire, comment une source doit-elle procéder pour signaler, à un destinataire, l'occurrence d'un évènement relatif à une OSR, et comment permettre à ce dernier d'interpréter correctement cet évènement quel que soit le contexte courant. Par source et destinataire, nous désignons les acteurs intervenant dans l'échange d'information de synchronisation de spectre dans notre architecture proposée (UPs-SBC, SBC-USs). Par synchronisation de spectre, nous entendons la mise en conformité des vues qu'ont la source et le destinataire, de l'état courant du spectre.

Spécifiquement, la notification des événements repose sur une paire de primitives de base associées à une base de données de contexte. La paire de primitives consiste en une primitive de signalement (obligatoire), et une primitive informative (optionnelle), complémentaire de la première. Essentiellement, ces primitives acheminent la configuration de l'utilisation du spectre, pour les besoins de la synchronisation de ce dernier. L'interprétation des primitives dépend du contexte (comme discuté plus loin) et, à ce titre, nous avons eu besoin d'une représentation du contexte que nous avons implémenté sous forme d'une base de données de contexte. Il faut rappeler, que les primitives de signalement sont implémentées grâce à des SCCs, du type discuté précédemment (section 2.5). Le schéma de notification proprement dit, se déroule selon la chronologie générale illustrée dans Figure.28. Il faut noter aussi que selon le contexte courant certains éléments seront nécessaires alors que d'autres pourraient être absents.

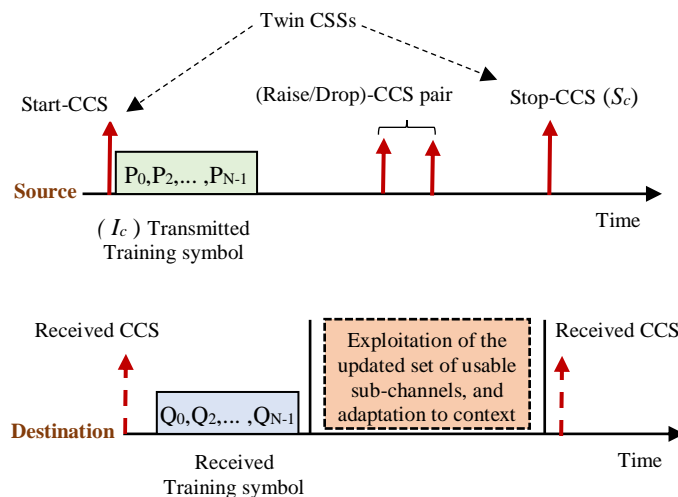


Figure 28 Chronologie des événements du schéma de notification

Dans la suite, nous allons décrire la paire de primitives de synchronisation de spectre, la base de données de contexte, et des scénarios d'utilisation illustratifs, respectivement. L'indice  $c$  dans ce qui suit indique des SCCs.

**Signalement  $S_c(type)$**  : Dans notre schéma, une source qui souhaiterait signaler un événement relatif à une OSR, duquel elle a fait, transmet une primitive de signalement,  $S_c(type)$ , pour solliciter du destinataire une réaction appropriée. Le paramètre  $type$ , dans  $S_c(type)$ , spécifie l'événement particulier que la primitive souhaite signaler (*Table 1*). Pour acheminer les événements multi-source multi-type à leur destination, la primitive  $S_c(type)$  est implémentée via plusieurs SCCs associées, chacune, à un couple distinct (événement-source, événement-type). Les SCCs sont la pierre angulaire de notre schéma de compte rendu à cause de leurs caractéristiques particulièrement intéressantes qui

incluent leurs courtes durées, leur détection presque instantanée, leur fiable détection à de faibles valeurs du SINR, et leur détection même en cours de réception des données. Le destinataire de la primitive  $S_c(type)$ , s'appuie complètement sur la SCC détectée pour identifier aussi bien la source que le type de l'évènement transmis et procède à l'appariement adéquat des primitives (RSO-start/RSO-stop, RSO-raise/RSO-drop).

Tableau 1 Types d'évènements leurs interprétation et implémentation

Event Type	Interpretation	Implementation
<i>RSO_start</i>	The start of a RSO.	Start-CCS
<i>RSO_stop</i>	The end of a RSO.	Stop-CCS
<i>RSO_raise</i>	An increase in the level (or degree) of some bearable quantity (interferences, contention activity, etc.), by a quantum that might be predefined or indicated as a parameter of $I_c$ primitive.	Raise-CCS
<i>RSO_drop</i>	A decrease in the level (or degree) of some bearable quantity (interferences, contention activity, etc.), by a quantum that might be predefined or indicated as a parameter of $I_c$ primitive.	Drop-CCS

**Information  $I_c(\text{further\_information})$  :** Dans les contextes où l'information acheminée par  $S_c(type)$  s'avère insuffisante, pour traiter l'évènement relatif à la OSR, une primitive informative,  $I_c$ , est transmise à la suite de  $S_c(type)$ , avec un timing approprié, pour compléter l'information. Le paramètre *further\_information*, contient l'information additionnelle permettant le traitement de l'évènement signalé. C'est à partir de la base de données de contexte que le destinataire (de  $S_c$ ) peut savoir s'il doit ou non s'attendre à recevoir une primitive informative. En effet, rappelons qu'il y a des contextes où cette primitive n'est pas nécessaire. L'association entre  $I_c$  et  $S_c$  associée est accomplie en imposant un timing, obligatoire, entre les instants de transmission des deux SCCs correspondantes. Cette disposition s'avère suffisante à cause des courtes durées des SCCs implémentant  $I_c$  et  $S_c$ .

**Description du contexte *Context\_db(BOA)* :** La signification, et par suite l'interprétation, des SCCs définies précédemment est, comme déjà signalé, dépendante du contexte (une conséquence de l'hétérogénéité des réseaux en jeu). Il est, donc, naturel que des différences dans le traitement des mêmes évènements/SCCs apparaissent lorsque la BOA passe d'une bande à une autre sur l'ensemble les différentes bandes de spectre du RSFH. En vérité, être au fait du contexte (pour les différents acteurs) joue un rôle central dans la levée de toute ambiguïté dans l'interprétation des SCCs, et la fourniture d'informations critiques pour une efficacité accrue (de la solution proposée en général, et du schéma de compte rendu en particulier). Cet état de fait étant admis, nous avons besoin alors d'une représentation du contexte. A cet effet, nous utilisons dans notre proposition une micro base de

données, *Context\_db*, pour stocker les descriptions du contexte de BOA, pour les diverses bandes radio visitées du RSFH (*Table 2*). Le paramètre BOA est utilisé pour accéder au contexte de la bande opérationnelle courante (sous licence). *Context\_db* est un ensemble d'enregistrements de quatre attributs, à savoir  $F_{req}$ ,  $T_{ime}$ ,  $B_{ear}$ , et  $A_{cce}$  relatifs à la fréquence, le temps, la quantité tolérable, et l'accès au spectre, respectivement (*Table 2*). Les valeurs prédéfinies, que chaque attribut peut prendre, ont des sens spécifiques et guident la génération, transmission, et interprétation des SCCs (implémentant les deux primitives de base).

Tableau 2 Structure de la base de données de contextes et valeurs des attributs

$F_{req}$ : Frequency	$T_{ime}$ : Time	$B_{ear}$ : Bearable quantity	$A_{cce}$ : Access
<b>Whole</b> The RSO encompasses the whole COB.	<b>Periodic</b> RSO likely to occur in equally spaced time slots or at periodic time instants.	<b>Interference_threshold</b> Bearable interferences	<b>Exclusive</b> Exclusive access to RSOs.
<b>Portion</b> The RSO is a portion of the whole COB.	<b>Continuous</b> RSO likely to last for quite a while. <b>Random</b> RSO to occur at random instants and lasts for random durations. <b>Pseudo-periodic</b> RSO likely to occur during periodic intervals.	<b>Activity_degree</b> Bearable activity	<b>Contention</b> Sharing or access in contention, with PUs.

Dans ce qui suit, nous donnons un aperçu du mécanisme opératoire du schéma de notification proposé (*Table 3*) à travers quatre scénarios illustratifs. L'ordre de présentation de ces scénarios est intentionnellement choisi pour refléter différents niveaux de sophistication, du mécanisme opératoire sous-jacent, de sa forme la plus simple (1<sup>er</sup> scénario) à celle la plus élaborée (4<sup>ème</sup> scénario) en passant par des formes moins élaborées.

**Le premier scénario** est celui où la BOA est une bande de spectre radio d'un réseau sans fil adoptant la technique d'accès TDMA (comme le GSM). L'attribut  $F_{req}$  a la valeur *Whole*, qui indique que pour signaler une OSR la source transmet une primitive  $S_c(RSO\_start)$ , seulement, c.à.d. qu'il n'y a pas lieu dans ce cas de transmettre une primitive  $I_c$  associée. Le destinataire de la primitive  $S_c$  (c.à.d. sa SCC) infère, à partir de la valeur de l'attribut  $F_{req}$ , qu'il n'y aura pas de primitive  $I_c$  qui suivra la primitive reçue et, qu'ainsi, toute la bande de spectre sera disponible, à partir de l'instant de détection

de la SCC de signalement. L'attribut  $T_{ime}$  a la valeur *Periodic*, qui signifie que dans le cas où la OSR signalée dure plusieurs "time-slots" successifs (logiquement mais non physiquement) la source n'aura pas besoin de transmettre autant de paires de primitives  $S_c(RSO\_start)$ ,  $S_c(RSO\_stop)$  qu'il y a de ces "time-slots". Au lieu de cela, une SCC- $S_c(RSO\_start)$  au premier "time-slot" libre et une SCC- $S_c(RSO\_stop)$  au dernier sont juste ce qu'il faut. Le destinataire de la première SCC- $S_c(RSO\_start)$  va considérer que la OSR correspondante sera disponible durant tous les "time-slots" (équidistants) compris entre le "time-slot" de détection de la SCC- $S_c(RSO\_start)$  et celui de la SCC- $S_c(RSO\_stop)$ . La procédure se répète, bien sûr, pour chaque OSR, donnant lieu à plusieurs transmissions (de SCCs) concurrentes. Il est clair que rendre compte et détecter les OSRs pourrait se révéler rapide et efficace, dans ce scénario, compte tenu d'une part, de la robustesse et de la courte durée des SCCs, et d'autre part, du nombre de transmissions réduit (une seule) et de la simplicité de la procédure.

**Le second scénario** est celui où la BOA est une bande de spectre radio d'un réseau sans fil adoptant la technique d'accès d'étalement de spectre (spread-spectrum comme le CDMA). L'attribut  $F_{req}$  a la valeur *Whole* et l'attribut  $T_{ime}$  la valeur *Continuous*, ce qui signifie que nous avons toute la bande de spectre à notre disposition durant tout l'intervalle séparant les transmissions de l'unique paire  $S_c(RSO\_start)$ ,  $S_c(RSO\_stop)$ , supposé durer assez longtemps. Cependant, l'attribut  $A_{cce}$  a la valeur *Contention* et l'attribut  $B_{ear}$  la valeur *Interference\_th*, qui signifient que les USs peuvent utiliser toute la bande la partageant, ainsi, avec les UPs et doivent à ce titre veiller à maintenir les interférences additionnelles qu'ils créent, dans la bande de spectre, en dessous d'un seuil tolérable donné par *Interference\_th*. La question clé, alors, est le schéma spécifique de contrôle de puissance qu'il faudra mettre en œuvre pour éviter la dégradation de performance du réseau primaire. Deux primitives  $S_c(RSO\_raise)$  et  $S_c(RSO\_drop)$  sont utilisées, par la source, pour signaler les changements dans le temps des interférences tolérables au sein du réseau sans fil primaire. Le destinataire applique le schéma de contrôle de puissance, dans sa zone de couverture, et interprète les primitives  $S_c$  (plutôt les SCCs correspondantes) en mettant à jour en conséquence la valeur de *Interference\_th*. Rendre compte des OSRs est, ici encore, rapide et efficace pour les mêmes raisons évoquées dans le premier scénario. Cependant, un schéma spécifique de contrôle de puissance est, en plus, nécessaire.

**Le troisième scénario** illustre le cas où la BOA est une bande de spectre radio d'un réseau sans fil exploitée selon la technique d'accès CSMA/CA (*Table 3*). L'attribut  $F_{req}$  a la valeur *Whole* et l'attribut  $T_{ime}$  a la valeur *Random*, ce qui signifie que toute la bande de spectre pourrait être utilisée, mais à des intervalles de temps aléatoires. De plus, l'attribut  $A_{cce}$  a la valeur *Contention* et l'attribut  $B_{ear}$  la valeur *Activity\_dg*, ce qui signifie que maintenant les USs devront se disputer pour toute la bande avec les UPs, mais vu que les UPs sont prioritaires les USs devront adapter leur activité pour

la maintenir en dessous d'un seuil tolérable donnée par  $Activity\_dg$ . La question clé, est alors le schéma spécifique de contrôle d'activité requis pour éviter de provoquer une dégradation de performance du réseau primaire. Les primitives  $S_c(RSO\_raise)$  et  $S_c(RSO\_drop)$  sont utilisées par la source pour signaler les changements, en cours de temps, du degré d'activité tolérable dans le réseau primaire. Le destinataire appliquera, alors, le schéma de contrôle d'activité, dans sa zone de couverture, et interprétera les primitives  $S_c$  (plutôt les SCCs correspondantes) en mettant à jour en conséquence la valeur de  $Activity\_dg$ . . Rendre compte des OSRs est, encore une fois, rapide et efficace pour les mêmes raisons évoquées dans les scénarios précédents. Cependant, un schéma spécifique de contrôle d'activité est requis en plus.

Tableau 3 Scénarios illustratifs (instanciation de la base de données de contextes)

<i>RAT</i>	<i>Frequency</i>	<i>Time</i>	<i>Bearable</i>	<i>Access</i>
TDMA	<i>Whole</i>	<i>Periodic</i>	<i>none</i>	<i>Exclusive</i>
CDMA	<i>Whole</i>	<i>Continuous</i>	<i>Interference_thr</i>	<i>Contention</i>
CSMA/CA	<i>Whole</i>	<i>Random</i>	<i>Activity_degree</i>	<i>Contention</i>
OFDMA	<i>Portion</i>	<i>Random</i>	<i>none</i>	<i>Exclusive</i>
SC-OFDMA	<i>Whole</i>	<i>Random</i>	<i>none</i>	<i>Exclusive</i>

**Le quatrième scénario** suppose que la BOA est la bande de spectre d'un réseau sans fil dont la TAR est de type OFDMA (Table 3). L'attribut  $F_{req}$  a la valeur *Portion* et l'attribut  $T_{ime}$  la valeur *Random*, annonçant un scénario plus élaboré que les précédents, car la source de la primitive  $S_c$  doit aussi transmettre, en temps opportun, une primitive informative  $I_c$  pour identifier la portion de spectre libre (OSR). La question clé, dans ce cas, est le schéma de détection des OSRs requis pour localiser le trou spectral signalé. Les primitives  $S_c(RSO\_start)$ ,  $S_c(RSO\_stop)$  sont utilisées du côté de la source conjointement avec la primitive  $I_c(further\_information)$  pour révéler la OSR. Du côté du destinataire, les  $S_c$ -CCSs détectées servent à limiter la OSR dans le temps, alors que le schéma de détection est utilisé pour délimiter la OSR en fréquence, en détectant le paramètre de  $I_c$ . Il faut noter que, dans ce cas, les schémas de reporting et de détection sont séparés, et la procédure entière prend plus de temps. Toutefois, en termes d'efficacité, nous avons une procédure avec seulement deux opérations : l'opération de reporting (inchangée) et l'opération de détection (nouvelle). Le schéma de détection est, dans ce cas, la pierre angulaire de toute la procédure (traité dans le chapitre.3).

## 2.7 Rôles et interactions des acteurs du schéma notification et détection

Dans cette section nous allons, essentiellement, détailler (développer) ce qui a été résumé dans la section 2.3. Rappelons que la question centrale posée est celle de savoir comment rendre I-CRICNet au fait des ressources radio oisives, dans les différents réseaux primaires, pour qu'il puisse les exploiter à son propre compte et supporter, ainsi, les communications en son sein de manière opportuniste. Globalement, la réponse peut être donnée en termes des acteurs intervenants, de leurs rôles respectifs, ainsi que des schémas protocolaires de leurs interactions. Les acteurs qui interviennent à l'échelle de tout le réseau hétérogène se divisent en quatre groupes, à savoir les SBCs, les MSBs, les UPs, et les USs. Pour une meilleure appréciation de ce qui va être présenté, il faut garder à l'esprit les points suivants :

- Les communications entre les SBCs et les SUs se font en mode TDMA half-duplex.
- Chaque acteur joue deux rôles principaux (en plus de son rôle traditionnel) selon qu'il s'agisse de la fonction migratoire ou celle de mise en œuvre du schéma de collecte des OSRs.
- Il faut considérer les rôles respectifs des acteurs dans leurs interactions mutuelles au sein d'une même fonction.

### 2.7.1 Rôles des différents acteurs dans la migration

#### 2.7.1.1 Les stations de base cognitives (SBCs)

Tout d'abord, nous allons commencer par les stations de base du réseau I-CRICNet (stations de base cognitives). La Figure.29, montre un diagramme de blocs qui représente notre vision du double système d'antennes dont chaque SBC, et chaque équipement d'utilisateur, est doté (US et UP). Chaque système d'antenne est composé d'un groupe de deux émetteur/récepteur ; le premier est dédié à une TAR particulière (parmi celles du RSFH), le deuxième est dédié aux échanges des SCCs. Chaque groupe d'émetteurs/récepteurs peut, indifféremment, utiliser l'une ou l'autre des deux antennes du système, communiquer avec l'autre groupe pour les besoins de synchronisation, coordination, et coopération. La technologie de ce type d'antennes est assez mûre pour rendre faisable ce que nous avançons [59] [60].

Dans I-CRICNet, chaque SBC à, en plus du rôle traditionnel de toute station de base d'un réseau sans fil, trois autres rôles principaux à savoir, la sélection de la bande de spectre qui aura le statut de BOA,

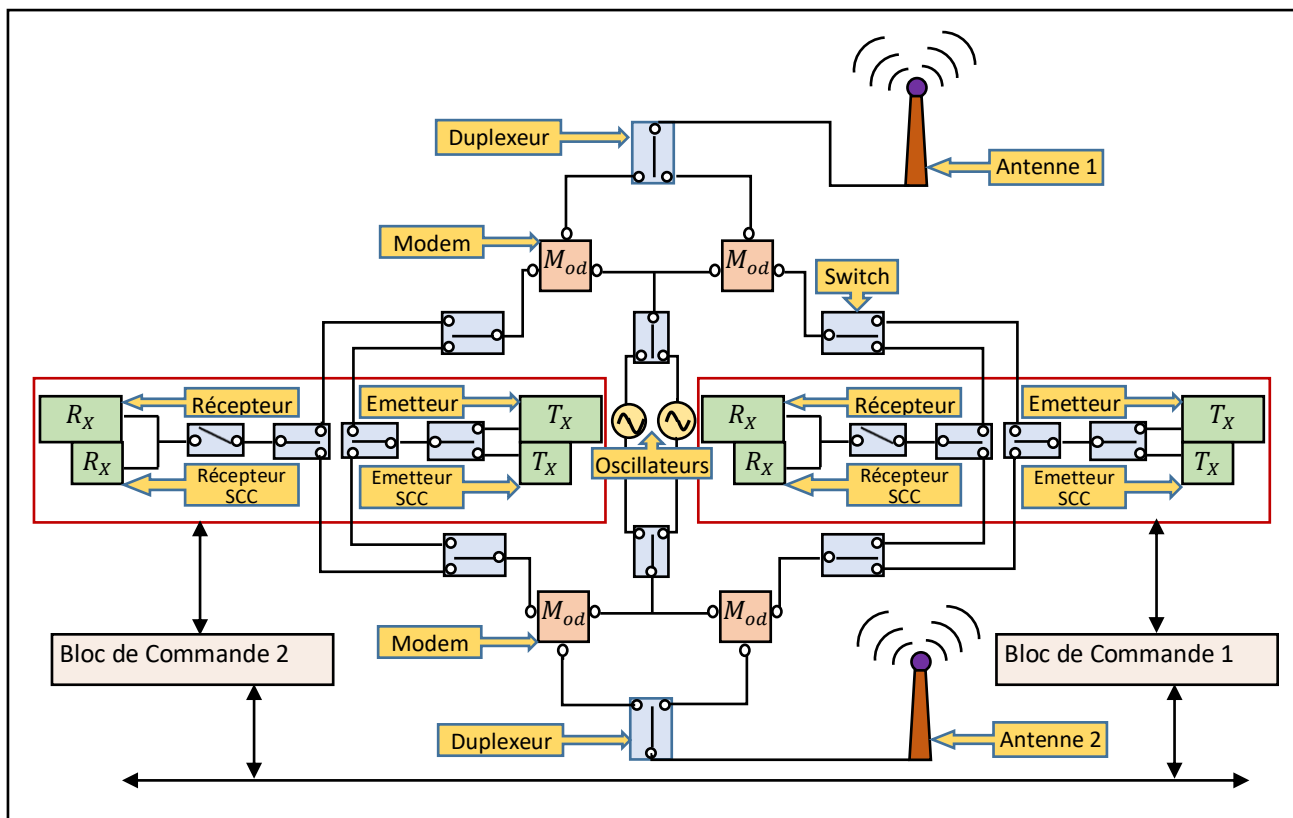


Figure 29 Diagramme de blocs du double système d’antennes équipant les SBCs, UPs, et USs

la migration de la BOA vers une nouvelle, ainsi que la participation active au schéma de récolte et de notification des OSRs. Dans son premier rôle, chaque SBC a l’obligation de sélectionner, parmi les bandes de spectre des différents réseaux sans fil composant le RSFH, la bande de spectre qui va supporter les communications actuelles dans sa zone de couverture. Cette bande sera la Bande Opérationnelle Actuelle (BOA) que la SBC annoncera aux USs qui lui sont attachés. Une fois la BOA connue, la SBC jouera aussi son rôle (troisième) de collecte des ressources radio nécessaires au support des communications (voir sous-section 2.5.1). La bande sélectionnée restera valide jusqu’à ce que la même SBC en décide autrement, en annonçant une nouvelle BOA (de la même manière qu’elle avait annoncé la bande précédente). Ainsi, au gré des conditions radio régnantes, la SBC va migrer d’une bande de spectre à une autre entraînant dans son sillage les USs qu’ils lui sont attachés. Chaque SBC n’exploitera, donc, qu’une seule bande à la fois (parmi celles des différents réseaux sans fil composants le RSFH). Pour être plus précis, disons que chaque SBC ne peut exploiter qu’une seule bande par système d’antennes. Cette précision est nécessaire car dans notre proposition chaque SBC est dotée, en fait, d’un double système d’antennes. Il s’avère que ce choix de conception apporte l’agilité, la flexibilité, et l’efficacité nécessaires pour que les SBCs puissent jouer pleinement les rôles qui leur sont dévolues, comme cela sera explicité dans la suite de cette sous-section et dans la sous-section suivante [61].

A notre connaissance, la notion de migration d'une bande de spectre à une autre n'a pas été considérée dans les travaux qui s'appuient sur la notion de réseaux cognitifs. L'usage, dans ces travaux et de considérer une large bande de spectre et d'appliquer différentes solutions pour capter, notifier, et exploiter les trous spectraux qui y apparaîtraient (ce que nous appelons OSRs). L'hypothèse faite par ces travaux, nous semble-t-il, est que la bande de travail pourra toujours fournir des trous spectraux pour soutenir les communications opportunistes. Nous pensons que cette hypothèse ne résisterait pas à une implémentation d'un réseau radio-cognitive réel, ou plutôt de réseaux radio-cognitive réels. En effet, sans coopération entre les différents réseaux cognitifs la bande de spectre deviendra très vite surchargée ; en fait même avec l'existence d'une coopération la congestion est possible, et il faudra chercher une nouvelle bande de spectre pour supporter les communications opportunistes. Ceci nous amène à la question de la migration des communications dans les réseaux radio-cognitive.

Il faut dire que la migration des communications opportunistes d'une bande à une autre se heurte à deux difficultés majeures, d'une part il faut informer tous les utilisateurs de cet évènement et de la future BOA, et d'autre part assurer la fluidité de cette migration. La première difficulté tiens au fait qu'il est difficile de réaliser, à moindre coût, la diffusion (broadcasting) dans les communications opportunistes, à cause du manque de synchronisation des ressources entre les différents intervenants (SBC et ses USs). Par synchronisation, nous entendons le fait pour tous les intervenants d'avoir une

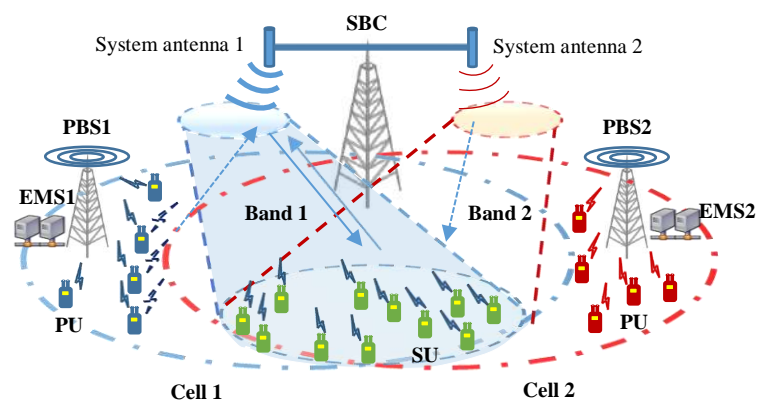


Figure 30 Situation de départ de la migration

même vue de l'état global actuel des OSRs ; elle sera du reste traitée dans le chapitre.3. La deuxième difficulté existe parce qu'il n'est pas prudent (voir impossible) d'autoriser, d'un seul coût, une migration massive et brusque de tous les USs (avec leur SBC de rattachement). Cette façon de faire est à bannir pour au moins deux raisons : en premier lieu cela engendrera une dégradation des

performances et un état chaotique préjudiciable au bon fonctionnement du réseau et à la fluidité de la migration ; en second lieu cela n'est pas toujours nécessaire. En effet, il y a des situations où on a juste besoin de décharger la BOA en migrants une partie des USs vers une autre bande, tout en maintenant la partie restante dans la BOA. En fait, c'est en déchargeant progressivement la BOA (vers la future BOA) que nous pensons pouvoir assurer la fluidité de la migration, et surmonter sa deuxième difficulté. Dans I-CRICNet, c'est cette option qui a été retenue, et qui donne d'ailleurs un début de sens à notre choix des SBCs à double système d'antennes. Le déroulement de la migration de la BOA est illustré dans Figure.30-32 que nous allons, dans ce qui suit, commenter.

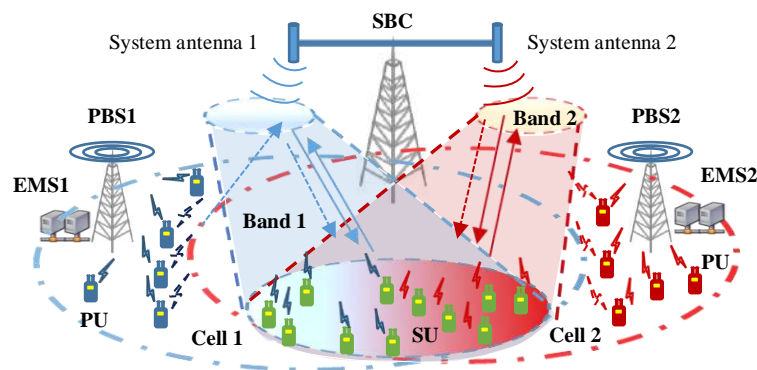


Figure 31 Situation à cheval entre deux bandes

Dans la situation de départ (Figure.30), la BOA est la bande "band 1", et elle supporte les communications entre la station de base cognitive SBC et ses utilisateurs (SUs) à travers son antenne "System antenna 1". Ces communications sont de nature opportunistes, c.à.d. qu'elles occupent des portions de spectre dans "band 1" (OSRs) non exploités par les communications entre la station de base primaire PBS1, de la cellule "Cellule1", et ses utilisateurs (PUs). Les OSRs sont signalées par les PUs de "Cellule1" à la station de base cognitive SBC qui, à son tour, relaye l'information à ses SUs. Ainsi, en plus des échanges avec leur station d'attachement PBS1, les PUs échangent de manière simultanée des messages de contrôle avec SBC sur l'antenne "System antenna 1". L'autre antenne de SBC, "System antenna 2", est utilisée pour l'envoi des messages de contrôle entre SBC et ses SUs, toujours dans la bande "band 1". Parmi ces messages de contrôle il y a celui qui annonce le commencement de la migration, et qui est signalé à l'aide d'une SCC dédiée à cet effet. A partir de ce moment, l'antenne "System antenna 2" va être synchronisée sur la bande primaire "bande 2" de "Cell 2", et va attendre de recevoir les SUs qui vont migrer vers cette bande.

Une fois l'évènement migratoire annoncé et l'antenne "System antenna 2" synchronisée, les SUs sélectionnés vont entamer la procédure leur permettant de basculer leurs communications vers la bande "band 2" de la cellule primaire "Cell 2". Cette procédure s'apparente à un "handover" classique mais plus performant car il ne s'effectue pas entre deux stations de base différentes et éloignées, nécessitant le transfert des données d'une station à une autre via le réseau cœur (core network). Tout au contraire, dans notre cas les deux bandes sont gérées par une même station à travers ses deux antennes, réduisant le "handover" à un simple basculement de fréquence. La Figure.31, représente la situation qui résulte de la migration d'une partie des SUs. On y observe une configuration où la station de base cognitive SBC est à cheval sur deux bandes de spectre, divisant l'ensemble des SUs en deux sous-ensembles dont les communications se déroulent, simultanément, sur deux bandes différentes. Le sous-ensemble des communications opportunistes dans la bande "band 2" entre SBC et ses SUs occupent les OSRs signalées par les PUs de la cellule primaire "Cell 2" attachés à la station primaire PBS2. Le double système d'antennes qui équipe chaque station de base cognitive (dans I-CRICNet) j'avère donc offrir les possibilités intéressantes suivantes :

- Il assure la fluidité de la migration dont il est question dans cette sous-section.
- Il permet de décharger une bande lorsque celle-ci devient surchargée ou que les conditions radio commencent à s'y détériorer.
- Il permet d'augmenter la capacité de la cellule cognitive du fait de l'exploitation de deux bandes simultanément.

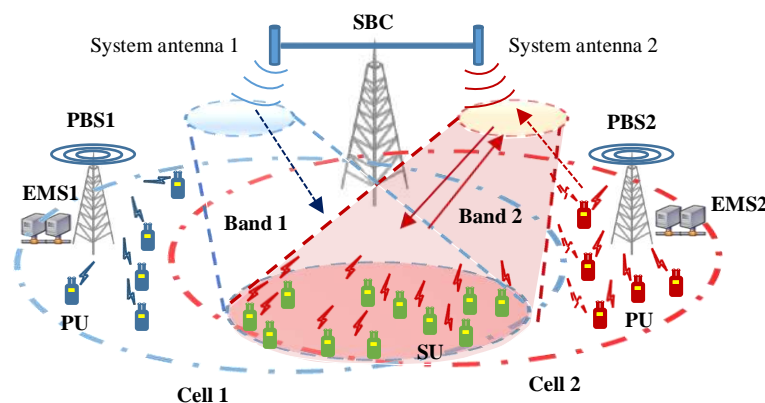


Figure 32 Situation finale de la migration

On pourra pousser la migration à son extrême et obtenir que tous les SUs migrent vers la bande "band 2" pour aboutir à une situation symétrique de la situation de départ (Figure.32). Toutes les communications opportunistes entre SBC et tous ses SUs se déroulent, maintenant, dans la bande

"band 2" de la cellule "Cell 2". L'antenne "system antenna 1" se charge désormais de l'envoi des messages de contrôle, et les PUs de la station PBS1 ne signaleront plus les OSRs de "band 1" à SBC. Toutefois, la station SBC pourra se préparer à un nouveau cycle de migration vers une nouvelle bande de spectre.

### 2.7.1.2 Les équipements utilisateurs (EUs)

Les choix de conception suivants sont rappelés pour une meilleure clarté de l'exposé des rôles des équipements utilisateurs, terme sous lequel nous regroupons les PUs et les SUs :

- Chaque EU peut fonctionner en deux modes à savoir le mode primaire (dans lequel il est désigné par PU) et le mode secondaire (dans lequel il est désigné par SU).
- Ces deux modes sont associés à deux interfaces physiques différentes de l'EU. La première interface est dédiée aux communications dans un seul des réseaux primaires sans fil composant le RSFH avec sa TAR propre. La deuxième interface est dédiée aux communications dans I-CRICNet avec la TAR NC-OFDMA.
- Il faut ajouter une troisième interface, légère celle-ci, pour l'envoi et la détection des CSSs.

Dans la migration, le rôle des PUs est réduit, d'une part (PUs de bande\_1), à cesser de signaler les OSRs dans la bande de la cellule quittée (bande\_1), dès qu'il n'y a plus de SUs associés à cette bande et, d'autre part (PUs de bande\_2), à commencer à signaler les OSRs dans la bande de la cellule visitée (bande\_2), pour accueillir les SUs migrants.

Le rôle des SUs dans la migration est de détecter les CSSs qui annoncent le début de cette opération (CSSs émises dans bande\_1 sur System-antenna\_2) et de décoder les messages complémentaires qui identifient les SUs concernés par la migration. Les SUs concernés, procéderont au basculement de leurs communications avec la SBC sur bande\_2 à travers system-antenna\_2.

Pour maîtriser le flux migratoire et en assurer la fluidité nécessaire, la SBC pourrait calculer un degré d'activité pour chaque SU qui lui est rattaché puis trier ces derniers selon ce facteur. Ce degré d'activité représente la fraction d'une durée de référence donnée pendant laquelle un SU est en activité (émission ou réception). Pour identifier les SUs concernés par la migration la SBC pourrait envoyer une valeur seuil discriminatoire. Les SUs ayant un degré d'activité en-dessous (ou au-dessus) de ce seuil pourront migrer ; les autres devront attendre. Le facteur d'activité pour un SU  $i$  ( $a_i$ ) pourrait être calculé comme suit :

$$a_i = \alpha a_{iTx} + (1 - \alpha) a_{iRx} \quad (1)$$

ou 
$$\alpha = \frac{\sum a_{iTx}}{\sum (a_{iTx} + a_{iRx})}$$

$a_{iTx}$  : degré d'activité en transmission de l'US  $i$   
 $a_{iRx}$  : degré d'activité en émission de l'US  $i$

La SBC diffuse les valeurs de  $\alpha$ , tandis que les valeurs de  $a_{iTx}$  et  $a_{iRx}$  pourraient être calculées par les SUs eux-mêmes.

### 2.7.1.3 Les micro-serveurs de bord (MSBs)

Dans cette sous-section nous allons aborder une question que nous avons, jusqu'à présent, passé sous silence. En effet, en parlant de la migration trois questions importantes, au moins, se posent à savoir :

- Comment reconnaître que la bande de départ risque de ne plus être propice au support de toutes les communications actuelles entre la SBC et ses SUs et qu'il faille donc trouver une autre bande pour y faire migrer ces communications ?
- Une fois la migration décidée, comment est choisie la bande destination, et est-ce que la migration doit être provisoire ou définitive ?
- Lorsque la migration est déclenchée, qui va instruire les PUs de la bande de destination de commencer, à leur tour, la notification des OSRs dans cette bande ? De même, lorsque la migration se termine, qui va instruire les PUs de la bande de départ d'arrêter la notification des OSRs dans cette bande pour le compte de l'actuelle SBC ?

Pour répondre à ces questions (et à d'autres encore qui seront traitées en temps opportun) nous proposons d'installer des micro-serveurs de bord (MSBs ou edge micro-servers) au niveau des réseaux d'accès radio (RAR) des réseaux primaires composant le RSFH (plus précisément au niveau des contrôleurs de stations de base, CSBs, ou des contrôleurs du réseau radio, CRRs). Ces MSBs maintiennent des liens avec les SBCs (via les réseaux cœur) d'une part, et avec les PUs (via les RAR) d'autre part. Les liens avec les SBCs servent, entre autres choses, à envoyer des rapports périodiques sur l'état des conditions radio qui règnent dans les cellules couvertes par les SBPs, la qualité des communications, le nombre d'utilisateurs...etc. Ces rapports seront exploités par I-CRICNet pour répondre aux deux premières questions posées ci-dessus. Les liens avec les PUs servent à établir des canaux de contrôle pour la collecte d'informations (détenues ou obtenues par les PUs) et l'envoi de

commandes (à ces mêmes PUs pour les instruire d'effectuer différentes actions ayant trait au fonctionnement global de I-CRICNet). En particulier, ces liens permettent de répondre à la troisième question posée.

Cette solution s'inspire du paradigme "Edge Computing" qui préconise le déplacement des infrastructures de calcul (et donc des services eux-mêmes) à proximité des utilisateurs finaux [62]

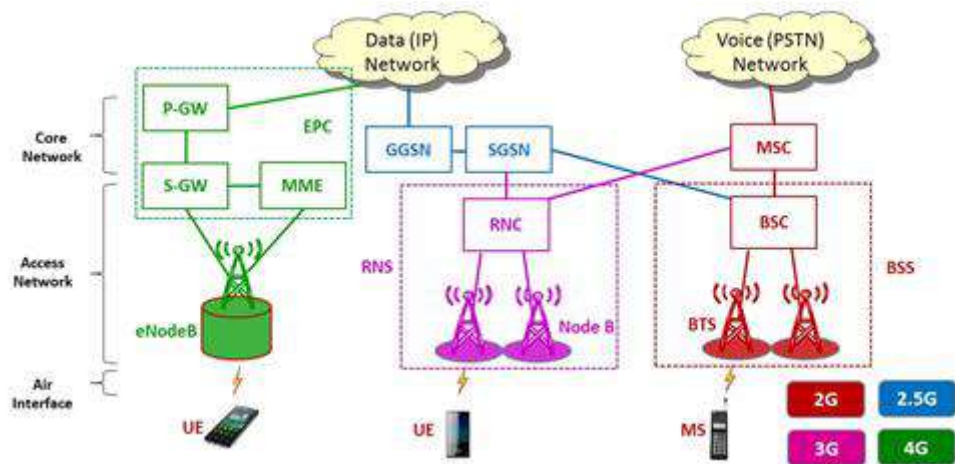


Figure 33 Architectures réseaux sans fils

[63]. A cause de la bande passante limitée d'Internet et des délais des réseaux WANs, les serveurs éloignés sont une des causes de la détérioration de la QoE. En déployant des serveurs à proximité des EUs qui nécessitent des interactions en temps-réel, la latence globale peut être diminuée de manière sensible, et une part non négligeable de la bande passante du réseau cœur est ainsi récupérée le rendant, du coût, moins vulnérable à la congestion.

L'installation des MSBs au niveau des BSCs, RNCs, ou eNodeBs des réseaux primaires s'adapte aux architectures de ces réseaux. La Figure.33 donne une vue d'ensemble de ces architectures qui consistent en deux grands sous-systèmes : le réseau d'accès radio et le réseau cœur. Le réseau d'accès radio est le premier grand composant logique de chaque réseau de transport, dont la responsabilité première est de jouer le rôle de médiateur pour l'accès aux canaux radio fournis et permettre la navette des paquets de données de et vers les EUs. En fait, ce composant est contrôlé par le contrôleur des ressources radio (RRC). Dans LTE, chaque station de base (eNodeB) abrite le RRC, qui maintient l'état machine du RRC et effectue toutes les affectations des ressources pour chaque utilisateur actif dans sa cellule. Dans d'autres réseaux (2G and 3G) le réseau d'accès radio est constitué par des contrôleurs de réseau radio qui ont à leurs charge des groupes de stations de bases (ou nœuds) sous le contrôle d'un BSC chacune. Le réseau cœur, qui est aussi connu par Evolved Packet Core (EPC) dans LTE est responsable du routage des données, la comptabilité, et la politique de gestion. En bref, c'est le composant qui connecte le réseau radio au réseau internet publique. La même figure montre

aussi combien les interfaces entre les différents composants sont précisément spécifiées permettant de greffer ou d'intercaler de nouveaux composants.

Nous pensons que notre choix de l'endroit de l'installation des MSBs répond en partie aux objectifs de l'"Edge Computing" [64] [63], et permet dans notre situation de collecter les informations relatives aux conditions radio, aux paramètres d'activité des PUs, et à la qualité des communications dans les cellules primaires. Ce choix permet aussi d'établir des liens spécifiques avec les PUs pour l'échange de données et de commandes. Nous espérons ainsi doter I-CRICNet de la réactivité nécessaire au bon fonctionnement des schémas de migration et de collecte des OSRs.

## 2.7.2 Schémas de protocoles de la notification des OSRs

Dans cette section, il est question des schémas de protocoles auxquels doivent se conformer les différents acteurs intervenant dans la notification des OSRs (notification selon les schémas qui ont fait l'objet des sections précédentes). Ces schémas devraient, rappelons-le, permettre à tous les partenaires communicants d'être au courant de l'état des OSRs dans la (ou les) BOA(s), à tout moment. Il importe de souligné que dans cette section nous nous intéressons à un seul des scénarios présentés en section.2.5, à savoir, le quatrième scénario ; qui correspond peut-être au cas le plus complexe. Outre la difficulté inhérente à la TAR elle-même (OFDM), il faut également tenir compte des deux modes de fonctionnement de la SBC (voir section.2.5.2.1.1), désignés par mode-réuni et mode-séparé. Pour ce scénario, nous présentons les schémas correspondants aux cinq situations suivantes :

- 1) SBC en mode-réunies&groupés, avec respectivement, apparition et extinction d'une OSR.
- 2) SBC en mode-séparées&divisés, avec, respectivement, apparition et extinction d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en réception.
- 3) SBC en mode-séparées&divisés avec, respectivement, apparition et extinction d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en émission.
- 4) SBC en mode-séparées&groupés, avec, respectivement, apparition et extinction d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en réception.
- 5) SBC en mode-séparées&groupés avec, respectivement, apparition et extinction d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en émission.

Pour la clarté de la présentation nous ferons usage de diagrammes de séquence UML que nous commenterons en précisant, dans chaque cas, les interactions ayant lieu et le rôle de chacun des acteurs intervenants.

### 2.7.2.1 SBC en mode-réunies&groupés avec apparition et extinction d'une OSR

En mode-réunies&groupés, les deux antennes d'une SBC ( $SB_{ant1}$  et  $SB_{ant2}$ ) communiquent sur la même bande de spectre primaire (elles sont réunies sur la même BOA), l'une en mode réception et l'autre en mode émission. Les USs émettent et reçoivent aussi sur la même bande (ils forment un seul groupe, c.à.d. groupés). Sur cette même bande se déroulent aussi les communications entre la SBP associée et ses UPs (SBP de Cellule\_1 sur Figure.34). Les EUs sont, tous, dotés de deux systèmes d'antennes, comme déjà signalé. A ce titre, les UPs utilisent l'une de deux antennes pour les

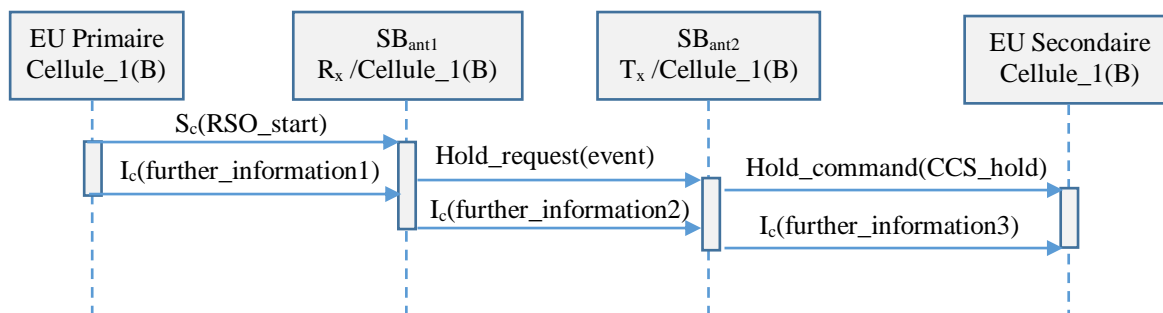


Figure 34 Schémas de notification d'occurrence d'OSR mode réunions&groupés

communications (courantes) avec leur SBP, alors que l'autre antenne est utilisée, occasionnellement, pour la signalisation et les communications avec la SBC. Les SUs dédient, chacun, une antenne à la réception et l'autre à la transmission avec la SBC de rattachement. Ces SUs peuvent, à tout moment, détecter les SCCs de signalisation relatives aux notifications des OSRs, même au cours des communications courantes avec leur SBC.

Lorsqu'une OSR se produit dans la BOA, le PU chargé de la notifier transmet, dans un premier temps, une SCC ( $S_c(RSO\_start)$ ) à la SBC pour lui signaler le début de cet évènement (début de l'OSR dans le domaine temporel) puis, dans un deuxième temps, fait suivre cette SCC par une séquence de symboles prédéfinie ( $I_c(further\_information1)$ ), pour permettre à la SBC de localiser cette OSR (sous forme de trou spectral dans le domaine fréquentiel). Les deux séquences ( $S_c(RSO\_start)$  et  $I_c(further\_information1)$ ), transmises par le UP, sont reçues à travers l'antenne en réception  $SB_{ant1}$  qui les relaye à l'antenne en émission  $SB_{ant2}$  ( $Hold\_request(event)$  et  $I_c(further\_information2)$ ). Cette dernière se charge alors d'en informer les SUs attachés à la SBC ( $Hold\_command(CCS\_hold)$  et  $I_c(further\_information3)$ ) (Figure.34). Toutefois, le bon déroulement de la procédure exige que

l'émission, par  $SB_{ant2}$ , de  $Hold\_command(CCS\_hold)$  doit précéder celle de  $I_c(further\_information1)$  par le PU qui notifie l'OSR. La raison derrière cette exigence est notre souci d'améliorer les conditions radio, pour une meilleur réception du complément d'information véhiculé par  $I_c(further\_information1)$ . En effet, en ordonnant l'arrêt des émissions des SUs on réduit, de la sorte, les interférences au niveau de l'antenne en réception de la SBC ( $SB_{ant1}$ ). La reprise, normale, des communications pourrait être indiquée par une SCC dédiée (transmise par l'antenne d'émission  $SB_{ant2}$ ). Toutefois, on pourrait faire l'économie d'une telle précaution puisque la durée qui sépare l'émission de  $Hold\_command(CCS\_hold)$  de la réception de  $I_c(further\_information3)$  par les USs est un des paramètres du réseau ; par conséquent la reprise pourrait être déclenchée dès que cette durée est écoulée. Le temps total mis pour signaler une OSR, dans cette situation (et qui est déduit de sa durée), est égal au temps écoulé entre la transmission de la  $S_c(RSO\_start)$  par le PU à la SBC, et la transmission de  $I_c(further\_information3)$  par la SBC à ses SUs.

L'extinction d'une OSR est notifiée au moyen d'une SCC ( $S_c(RSO\_stop)$ ), par le même PU qui a notifié son début, comme illustré sur la Figure.35. En effet, dans notre proposition les SCCs de types  $S_c(RSO\_stop)$  et  $S_c(RSO\_start)$  sont appariées de telle sorte que la transmission d'une  $S_c(RSO\_stop)$  permet d'identifier la  $S_c(RSO\_start)$  qui lui est associée et, par voie de conséquence, identifier la OSR

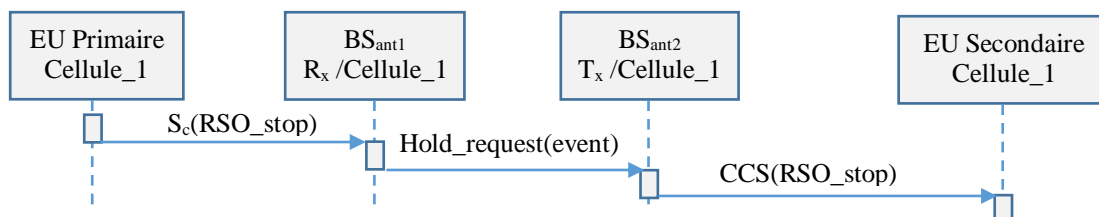


Figure 35 Schéma de notification d'extinction d'OSR mode réunies&groupés

déjà notifiée qui vient de disparaître. Cette manière de faire simplifie la notification de la fin d'une OSR et réduit, ainsi, la durée totale nécessaire au traitement d'une OSR (apparition + extinction).

### 2.7.2.2 SBC en mode séparées&divisés avec apparition d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en réception

En mode-séparées&divisés, l'une des deux antennes d'une SBC est en mode réception sur une première bande primaire (celle de Cellule\_1) alors que l'autre antenne est en mode émission sur une deuxième bande primaire, différente de la première (celle de Cellule\_2) ; elles sont donc séparées. Les SUs sont partagés (divisés) en deux groupes : le groupe des SUs en mode émission (associés à  $SBC_{ant1}$ ) et celui des SUs en réception (associé à  $SBC_{ant2}$ ). Il y a, aussi, deux groupes de PUs, l'un attaché à la cellule primaire Cellule\_1 (sur une bande B1) et l'autre à Cellule\_2 (sur une bande B2). Ces deux groupes sont la source des notifications des OSRs, chacun dans la bande qui le concerne

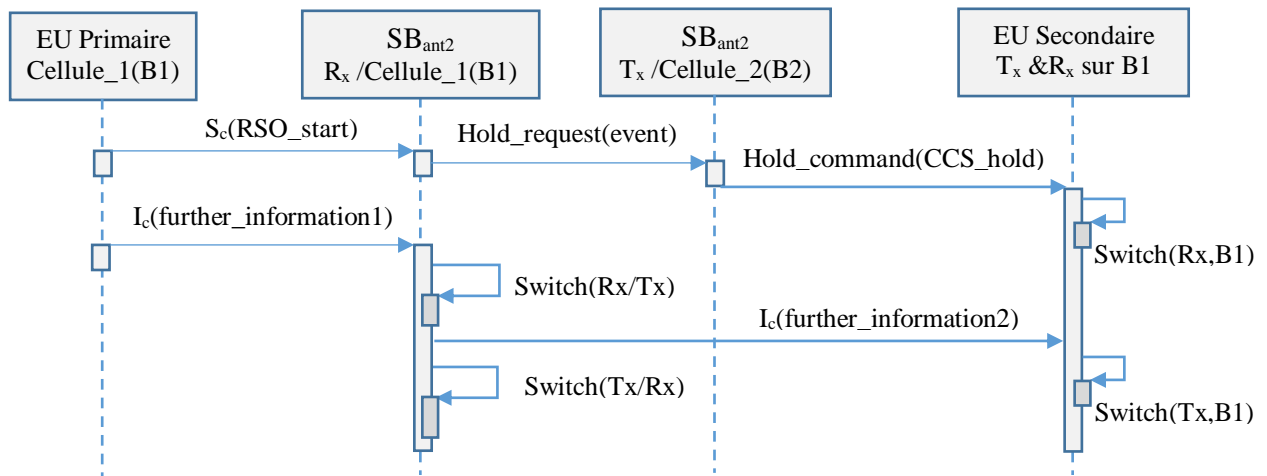


Figure 36 Schéma de notification d'occurrence d'OSR mode séparés&divisés à l'antenne en réception

(B1 et B2 respectivement). Lorsqu'une OSR se produit dans la bande de Cellule\_1 (cellule qui correspond à l'antenne en mode réception, de la SBC), le PU chargé de la notifier procède comme dans le cas précédent, Il signale par une SCC ( $S_c(\text{RSO\_start})$ ) le début de l'OSR dans le domaine temporel, puis fait suivre cette SCC par une séquence de symboles ( $I_c(\text{further\_information1})$ ) permettant la localisation de l'OSR dans le domaine fréquentiel (sous forme de trou spectral). Les deux séquences transmises sont reçues à travers l'antenne en réception de la SBC ( $\text{SBC}_{\text{ant1}}$ ) (Figure.36). Ici encore, l'émission de  $I_c(\text{further\_information1})$  par le PU qui notifie l'OSR (Figure.36) doit attendre celle de  $\text{Hold\_command}(\text{CCS\_hold})$  par l'antenne en émission  $\text{SBC}_{\text{ant2}}$  pour que les SUs qui transmettent vers  $\text{SBC}_{\text{ant1}}$  arrêtent leurs émissions, réduisant ainsi les interférences sur  $\text{SBC}_{\text{ant1}}$ , pour une meilleure réception des données, contenues dans  $I_c(\text{further\_information1})$ , transmises par le PU qui notifie l'OSR. Après réception de  $I_c(\text{further\_information1})$ , l'antenne  $\text{SBC}_{\text{ant1}}$  doit basculer vers le mode émission pour pouvoir relayer l'information contenue dans  $I_c(\text{further\_information1})$  vers le groupe des SUs qui lui sont associés ( $I_c(\text{further\_information2})$ ). Une fois cette information transmise, l'antenne  $\text{SB}_{\text{ant1}}$  bascule à nouveau vers le mode réception pour reprendre les communications (opportunistes) courantes là où elles étaient. Maintenant, l'ensemble des OSRs supportant les communications opportunistes dans la bande primaire de Cellule\_1 est augmenté de la nouvelle OSR notifiée. On aurait pu utiliser une SCC dédiée pour annoncer le reprise, de manière asynchrone, des communications après le traitement de l'occurrence de l'OSR. Toutefois, on préfère faire l'économie d'une telle procédure puisque la synchronisation sur le début et la fin de la transmission de  $I_c(\text{further\_information2})$ , ainsi que sur le temps que met l'antenne pour basculer de l'émission vers la réception et vice versa, est possible (vu que ces instants sont prédictibles et font partie des paramètres de réseau).

La notification de la fin (extinction) d'une OSR, dans ce cas, suit le même schéma que celui de la situation précédente, avec la même simplicité et la même conséquence en termes de réduction de la durée totale nécessaire au traitement d'une OSR (apparition + disparition), Figure.37.

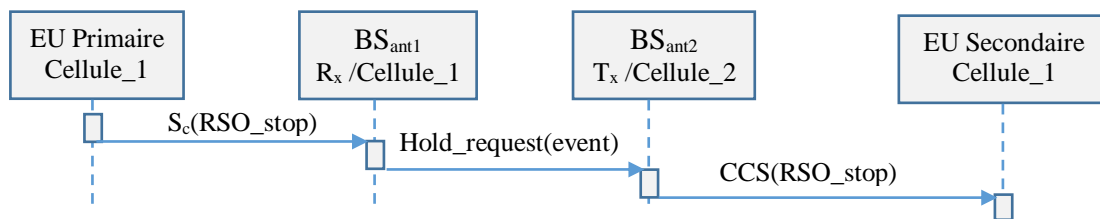


Figure 37 Schéma de notification d'extinction d'OSR mode séparés&divisés à l'antenne en réception

### 2.7.2.3 SBC en mode séparés&divisés avec apparition d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en émission

Cette situation est symétrique par rapport à la précédente, en ce sens que la SBC est en mode- séparé mais que l'OSR apparaît dans la bande primaire qui correspond l'antenne d'émission,  $SB_{ant2}$ , de la SBC. La SBC reçoit, à travers son antenne  $SB_{ant1}$ , dans Cellule\_1 et émet, à travers son antenne  $SB_{ant2}$ ,

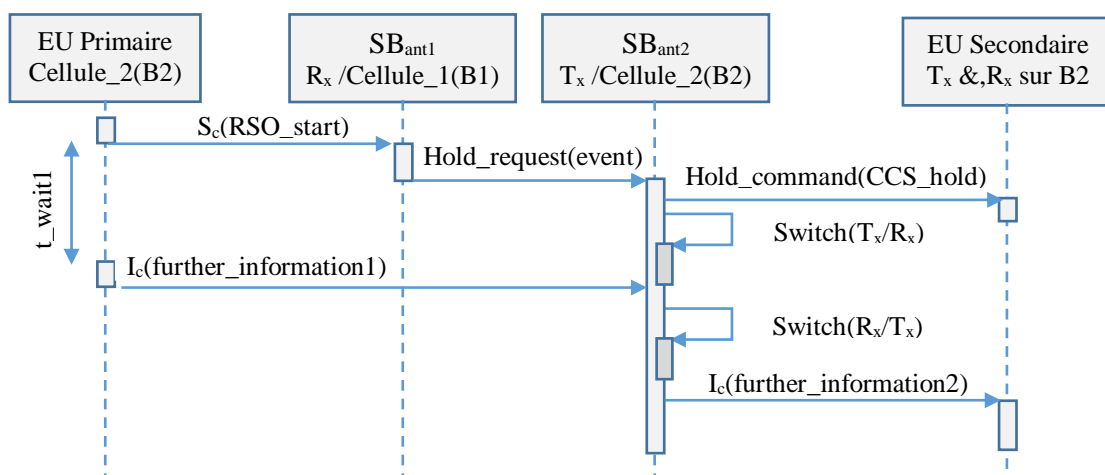


Figure 38 Schéma de notification d'occurrence d'OSR mode séparés&divisés à l'antenne en émission

dans Cellule\_2 (Figure.38). Les SUs sont aussi partagés en deux groupes : le groupe des SUs en mode émission (associés  $SBC_{ant1}$ ) et celui des SUs en réception (associé à  $SBC_{ant2}$ ). Comme déjà présenté, il y a les mêmes deux groupes de PUs, l'un attachés à la cellule primaire Cellule\_1 et l'autre à Cellule\_2, dont le rôle est de notifier les OSRs dans leurs bandes respectives.

Lorsqu'une OSR se produit dans la bande de Cellule\_2 (cellule qui correspond à l'antenne en mode émission de la SBC), le PU chargé de la notifier commence par signaler, par une SCC ( $S_c(RSO\_start)$ ), le début de l'OSR dans le domaine temporel. C'est, toujours, l'antenne  $SBC_{ant1}$  qui détecte ce premier évènement, mais le complément d'information,  $I_c(further\_information1)$ , qui permettra la localisation de l'OSR dans le domaine fréquentiel devra, cette fois-ci, être envoyé dans

la bande primaire associée à Cellul\_2 et, donc, reçu à travers l'antenne  $SB_{ant2}$  de la SBC. Pour ce faire, l'antenne  $SB_{ant2}$  doit basculer en mode réception afin de recevoir  $I_c(\text{further\_information1})$ , en provenance du PU qui notifie l'OSR. Avant ce basculement,  $SB_{ant2}$  devra prévenir ses SUs (via la SCC Hold\_command(CCS\_hold)) de la suspension momentanée de ses émissions pour prendre en charge la notification. A la détection de Hold\_command(CCS\_hold), les SUs suspendent leurs communications courantes et se mettent en attente de l'arrivée de  $I_c(\text{further\_information2})$ . Après le basculement,  $SB_{ant2}$  reçoit  $I_c(\text{further\_information1})$ , bascule à nouveau en mode émission, relaye l'information contenue dans  $I_c(\text{further\_information1})$  à ses SUs ( $I_c(\text{further\_information2})$ ), et reprend ses émissions là où elles étaient. Maintenant, l'ensemble des OSRs supportant les communications opportunistes dans la bande primaire de Cellule\_2 est augmenté de la nouvelle OSR notifiée. Le même commentaire fait à la sous-section précédente, au sujet de l'approche synchrone et asynchrone, peut être faite ici encore.

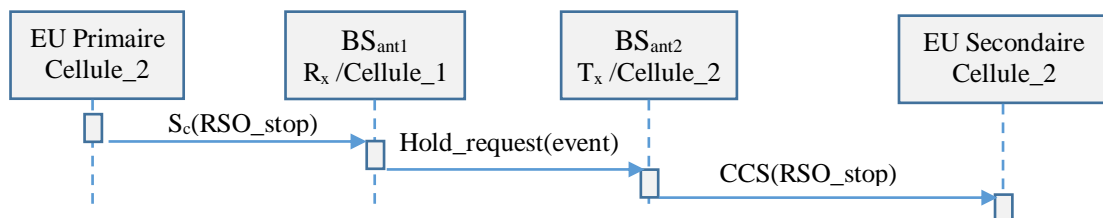


Figure 39 Schéma de notification d'extinction d'OSR mode partagées&divisées à l'antenne en émission

La notification de la fin (extinction) d'une OSR, dans ce cas, suit un schéma qui ressemble à celui de la situation précédente, à la différence que la SCC CCS(RSO\_stop) est envoyée par  $SB_{ant2}$  sur la bande de Cellule\_2 (figure.39). La procédure conserve la même simplicité et la même conséquence en termes de réduction de la durée totale nécessaire au traitement d'une OSR (apparition + extinction).

#### 2.7.2.4 SBC en mode partagées&groupés avec apparition d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en réception

Cette situation est comparable à celle présentée en section 2.2 à ceci près que les USs forment un seul groupe, au lieu d'être partagés en deux, mais utilisent deux bandes différentes ; l'une pour l'émission et l'autre pour la réception (B1 et B2). Les schémas traitant l'apparition et l'extinction d'un OSR (Figure.40) sont les mêmes que ceux de la section 2.2 sauf que maintenant tous les USs sont impliqués (et non pas l'un des deux sous-groupes).

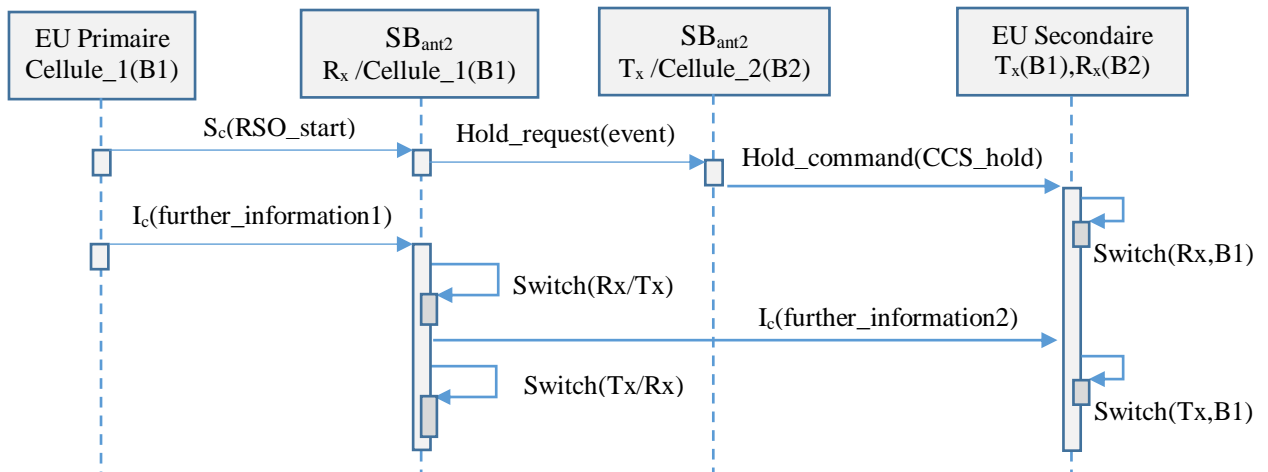


Figure 40 Schéma de notification d'occurrence d'OSR mode partagées&groupées à l'antenne en réception

### 2.7.2.5 SBC en mode partagées&groupés avec apparition d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en émission

Cette situation (Figure.41) est comparable à celle présentée en section 2.3 à ceci près que les USs forment un seul groupe, au lieu d'être partagés en deux, mais utilisent deux bandes différentes ; l'une pour l'émission et l'autre pour la réception (B1 et B2). Les schémas traitant l'apparition et l'extinction d'un OSR sont les mêmes que ceux de la section 2.3 sauf que maintenant tous les USs sont impliqués (et non pas l'un des deux sous-groupes).

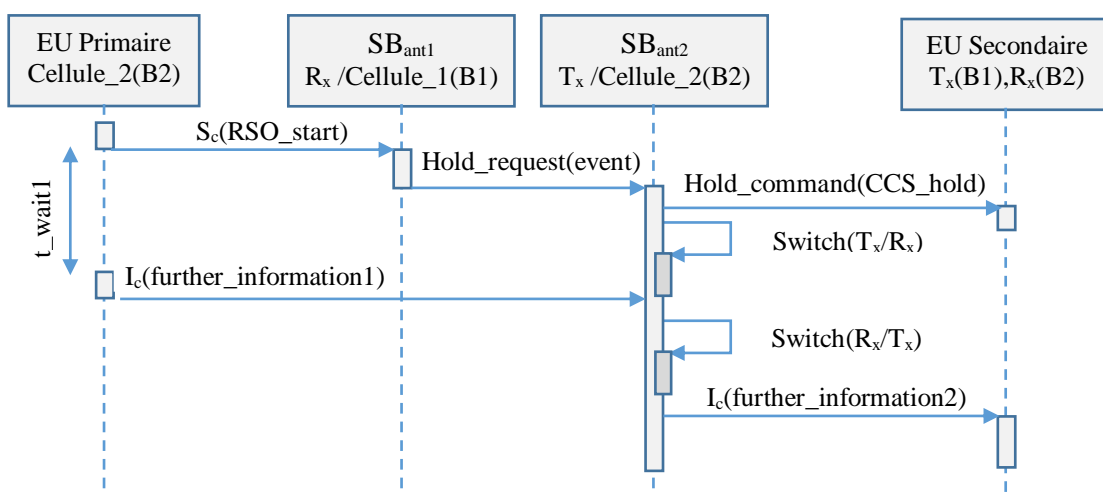


Figure 41 Schéma de notification d'occurrence d'OSR mode partagées&divisées à l'antenne en émission

### 2.7.3 Rôles des différents acteurs dans la notification des OSRs

Cette section, est dédiée à la description du rôle de chacun des différents acteurs intervenants dans les schémas de protocole de notification des OSRs (schémas qui ont fait l'objet de la section précédente). La motivation première de cette section, est de fournir des éléments qui permettront de se prononcer sur la capacité à être automatisé, ainsi que sur la complexité, des schémas de notification présentés jusqu'à présent. La description faite, qui est orientée plutôt vers la mise en œuvre pratique, utilise les diagrammes d'états pour donner une vue synthétique du rôle de chaque acteur en regroupant ses différentes interventions (dispersées dans les différents schémas de protocole) dans une même représentation. Les acteurs, comme déjà signalé, appartiennent à trois groupes, à savoir : les PUs, les SBCs, et les SUs ; c'est selon cet ordre que leurs rôles vont être présentés.

#### 2.7.3.1 Diagramme d'état des UPs

Le rôle des UPs est le plus simple (et le plus déterminant) ; il consiste à émettre les signaux et données qui caractérisent l'occurrence d'une OSR Figure.42. Concrètement, un  $UP_i$  qui reconnaît une OSR

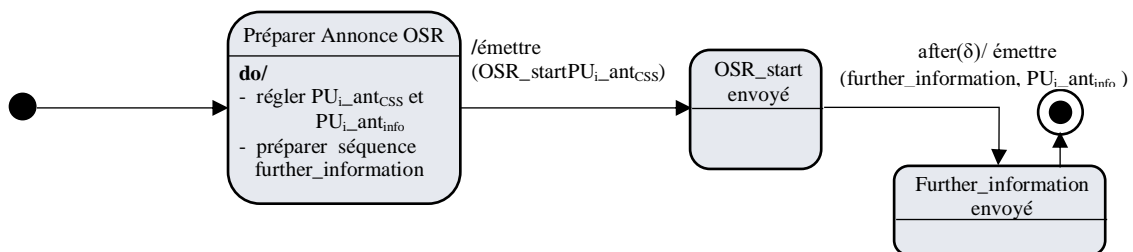


Figure 42 Diagramme d'état UPs

envoie, dans un premier temps, une SCC ( $OSR-start$ ) pour avertir de cet événement et, dans un deuxième temps, fait suivre ce signal par une séquence de symboles ( $further\_information$ ) pour identifier cette OSR. Les deux transmissions précédentes se font à travers les antennes dénommées  $PU_i_{ant_{SCC}}$  et  $PU_i_{ant_{info}}$  respectivement. Les deux dénominations peuvent, au fil du temps, désigner une même antenne ou deux antennes différentes, selon que la bande ou l'OSR apparaît coïncide ou non avec la bande sur laquelle est réglé l'antenne de réception de la SBC. Il se peut donc, que la SCC  $OSR-start$  et la séquence  $further\_information$  soient transmises sur la même bande ou au contraire sur deux bandes différentes.

### 2.7.3.2 Diagramme d'état des SBCs

Puisque chaque SBC est dotée de deux systèmes d'antennes et que chaque antenne peut être en réception ( $R_x$ ) ou en transmission ( $T_x$ ), il y a lieu de distinguer, donc, les deux rôles correspondants. Les deux rôles sont complémentaires, comme il sera expliqué ci-après, puisque lorsqu'une des deux antennes est en émission l'autre devra être en réception.

#### a) Système d'antenne en réception (Figure.43)

C'est toujours l'antenne en réception qui reçoit la SCC *OSR\_start*, cela permet d'assurer l'asynchronisme nécessaire pour signaler l'événement associé à l'OSR, à tout moment. Quant à la séquence *further\_information*, elle est reçue par l'antenne en réception seulement dans le cas où la

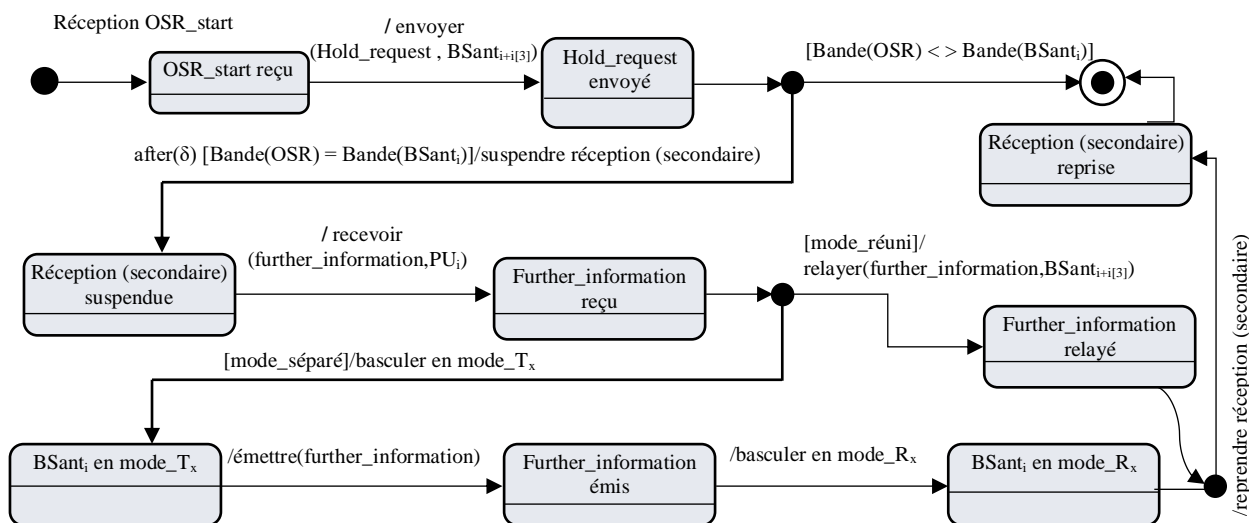


Figure 43 Diagramme d'état SBC, antenne en réception

bande dans laquelle l'OSR se produit est la même que celle dans laquelle l'antenne reçoit. Dans tous les cas, l'antenne en réception relaye *OSR\_start* à l'autre antenne (qui s'en occupera) sous forme d'une requête *Hold-request*. Lorsque c'est l'antenne en réception qui reçoit *further\_information* (de la part d'un UP), son comportement dépendra du mode de fonctionnement en cours. En mode réuni elle relaye cette information à l'autre antenne et son rôle s'arrête là. En mode séparé, elle devra elle-même se charger de transmettre cette information aux USs ; pour cela elle basculera en mode  $T_x$ , diffuse *further\_information* puis rebasculera en mode  $R_x$  pour reprendre la réception normale.

#### b) Système d'antenne en émission (Figure.44)

L'antenne en mode  $T_x$  entre en jeu dès qu'elle reçoit la requête *Hold\_request* (de la part de l'antenne en mode  $R_x$ ) ; son rôle consiste à avertir les USs qu'une OSR est sur le point de se présenter. Les USs

devront alors cesser toute communication de données opportunistes (ce qui diminue les interférences et améliore les conditions radio pour une meilleure détection des signaux et données échangées liés à l'OSR en question). Ensuite, le rôle de l'antenne dépendra du mode fonctionnement ; en mode réuni, l'antenne attendra de récupérer *further\_information* (de la part de l'antenne en  $R_x$ ) puis diffusera cette

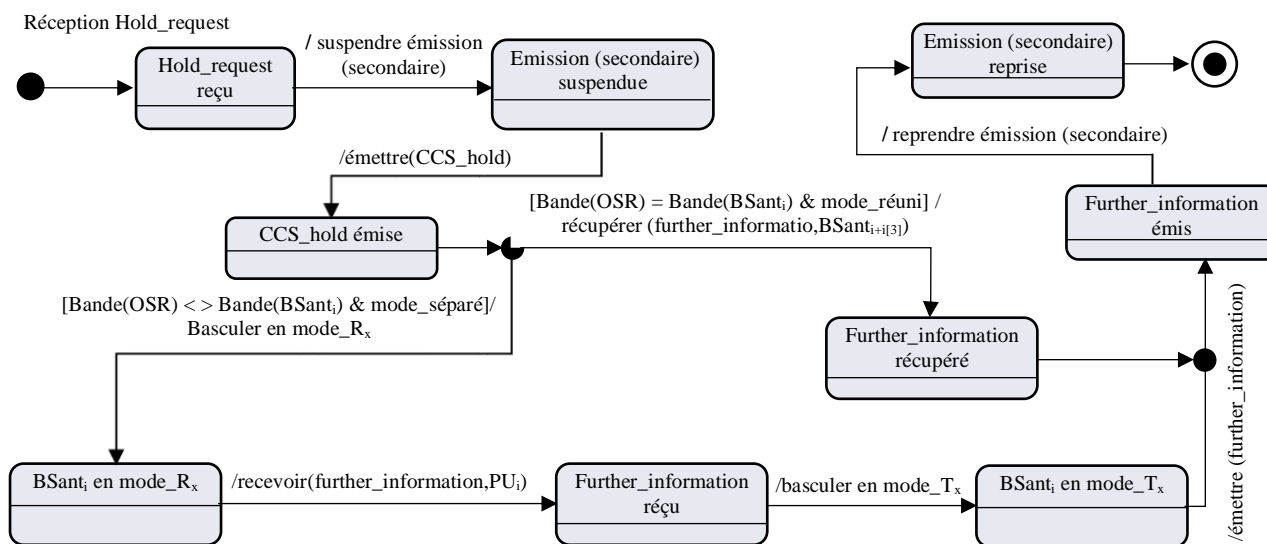


Figure 44 Diagramme d'état SBC, antenne en émission

information aux USs. En mode séparé, l'antenne devra elle-même recevoir *further\_information* pour la diffuser aux USs ; pour cela elle devra basculer en mode  $R_x$ , recevoir *further\_information*, puis rebasculer en mode  $T_x$ , diffuser cette dernière information, et reprendre la transmission normale.

### 2.7.3.3 Diagramme d'état des USs

Chaque US est doté de deux antennes, l'une d'elles est affectée aux communications opportunistes ( $SU_i ant_{comm}$  qui elle alterne les modes  $R_x$  et  $T_x$ ), l'autre en mode  $R_x$  ( $SU_i ant_{surv}$ ) est réglée sur la bande dans laquelle la SBC transmet (pour recevoir *OSR\_start*). Par conséquent, il faut distinguer les deux rôles correspondants.

#### a) Système d'antenne en réception ( $SU_i ant_{surv}$ ) (Figure.45)

C'est cette antenne qui reçoit la SCC *CCS\_hold*, envoyée par l'antenne en  $T_x$  de la SBC, en traduction de la requête *Hold\_request* (voir section précédente). Si l'OSR annoncée par la SCC ne va pas se produire dans la bande dans laquelle l'antenne reçoit, alors celle-ci se contentera de prévenir l'autre antenne ( $SU_i ant_{comm}$ ) pour la prise en charge du résultat de l'OSR, et son rôle s'arrête là. Sinon, elle suspend ses réceptions de données, et demande à l'autre antenne de suspendre ses émissions de

données (si en mode réuni). En mode séparé, elle se synchronise en attendant la suspension des émissions. Son rôle s'arrête là, et elle reprend la réception normale dans le cas où l'OSR ne va pas se produire dans la bande dans laquelle l'antenne reçoit ; dans le cas contraire, elle va elle-même

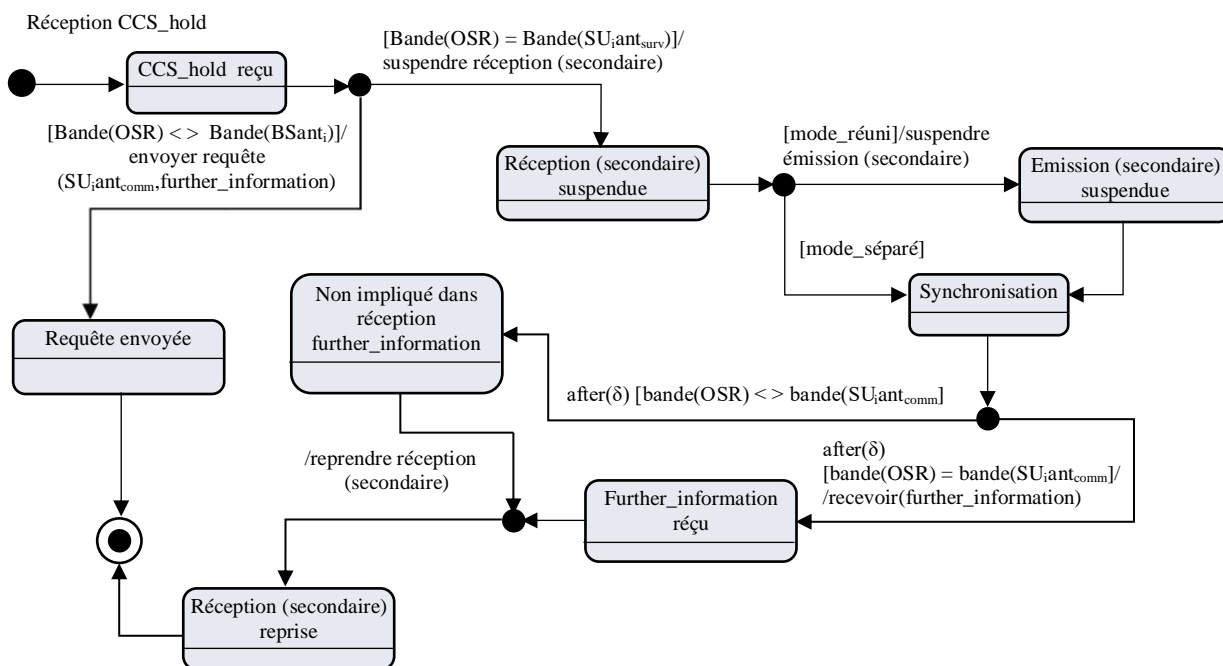


Figure 45 Diagramme d'état US, antenne en réception

recevoir *further\_information*, et mettre à jour l'état global des OSRs qui vont supporter les communications opportunistes dans la suite. Enfin, elle reprend l'émission normale, mais dans la portion de spectre identifiée par la mise à jour, juste, effectuée.

b) **Système d'antenne en émission ( $SU_{i\text{antcomm}}$ ) (Figure.46)**

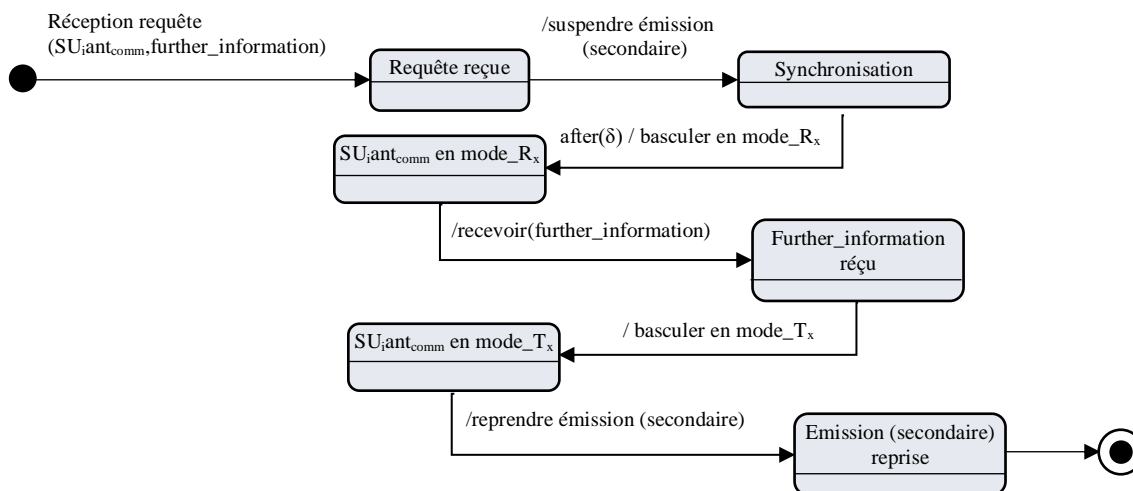


Figure 46 Diagramme d'état US, antenne en émission

Cette antenne est sollicitée, par l'autre antenne, lorsque l'OSR va se produire dans la bande dans laquelle  $SU_{i\text{ant}_{comm}}$  émet et que  $SU_{i\text{ant}_{surv}}$  (qui est en mode  $R_x$ ) est réglée sur une autre bande. L'antenne  $SU_{i\text{ant}_{comm}}$  va, alors, basculer en mode  $R_x$  pour pouvoir recevoir *further\_information*, rebasculer en mode  $T_x$  et reprendre son émission normale.

## 2.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la première contribution de notre thèse. Nous y avons présenté l'architecture d'un réseau, que nous dénommons I-CRICNet, capable de réaliser l'intégration transparente d'un ensemble de réseaux sans fil hétérogènes en exploitant les ressources radio oisives de ces derniers. Les communications sans fil dans I-CRICNet se font dans la technologie d'accès réseau NC-OFDM. Les acteurs de cette architecture dont le rôle est de prendre en charge les communications sans fil au sein d'I-CRICNet, sont dotés d'un double système d'antennes de communication. Ce choix a facilité (ou rendu possible) l'implémentation de fonctions importantes du réseau. Ces fonctions incluent, l'intégration via les équipements utilisateurs, le captage est la notification des OSRs selon le schéma LAT (Listen And Talk) [65] [66] au lieu de celui du LBT (Listen Before Talk), la migration des communications de manière souple et progressive, et l'équilibrage de charge. Le revers de la médaille est que choix de système d'antennes crée plusieurs modes de fonctionnement selon que les antennes sont groupées ou séparées (communiquent sur la même bande ou sur deux bandes différentes) ou que les utilisateurs sont aussi groupés ou divisés (forment un seul groupe ou deux groupes différents). Nous avons aussi conçu un schéma générique de captage et notification des OSRs qui fonctionne dans des réseaux utilisant des TAR hétérogènes. Nous avons mis à l'épreuve ce schéma dans les différents modes de fonctionnement du réseau I-CRICNet et nous avons, aussi, donné les diagrammes d'activités des différents composants du réseau pour apprécier la faisabilité et la complexité de nos propositions.

---

## *CHAPITRE 3*

### *SCHEMA COOPERATIF GENERIQUE DE COLLECTE DES OPPORTUNITES DE RESSOURCES RADIO*

---

Ce chapitre est, principalement, consacré à une question clé de l'étude de faisabilité de certaines des propositions exposées dans le chapitre précédent. Il s'agit, précisément, des techniques de captage/surveillance de spectre (spectrum sensing/monitoring) qui constituent le fondement des communications opportunistes dans les RRCs en général et dans I-CRICNet en particulier. Rappelons que, sommairement, notre réseau I-CRICNet est composé d'un ensemble de cellules, réparties pour couvrir des régions caractérisées par la coexistence de plusieurs réseaux sans fils hétérogènes (RSFHs), appelés réseaux primaires. Les communications au sein de I-CRICNet se font, dans ces cellules, de manière opportuniste (exploitant les trous spectraux d'une des bandes de spectre du RSFH, à la fois), et sont gérées par des stations-de-base cognitives (SBCs) migrantes. Les utilisateurs du réseau I-CRICNet sont appelés utilisateurs secondaires (USs) par opposition aux utilisateurs (prioritaires) des RSFHs appelées, eux, utilisateurs primaires (UPs). Ces choix architecturaux engendrent, évidemment, des besoins fonctionnels propres, qu'il faudra satisfaire. Parmi tous ces besoins fonctionnels il y en a un qui est fondamental, à savoir : assurer les communications opportunistes. Cela suppose de pouvoir détecter et signaler les opportunités de communications (trous spectraux), les libérer au besoin, de même que protéger les UPs des interférences dues aux communications des USs. C'est de ces aspects que nous allons traiter dans les sections suivantes.

Fondamentalement, communiquer de manière opportuniste (dans une bande de spectre donnée) implique, d'une part, qu'on ne s'autorise l'utilisation de la bande en question que lorsque celle-ci n'est pas déjà occupée par des UPs communicants, et exige, d'autre part, d'être capable de détecter l'occurrence d'un trou spectral (qui constituera, alors, une opportunité pour communiquer). Le problème générique sous-jacent que nous allons considérer va être, donc, un problème de détection

de signal. Il se pose à la réception d'un signal,  $r[n]$ , à travers un canal brouillé, et consiste à décider si ce signal reçu contient un autre signal  $s[n]$  (connu ou non), ou bien, que c'est juste du bruit. La présence d'un signal indique que le canal de communication est occupé par un UP (l'utilisation du canal est alors prohibée), tandis que l'absence de signal, c.à.d. la présence d'un bruit seul, indique que le canal de communication est libre et peut être utilisé pour les communications opportunistes. Le problème peut être modélisé comme suit [67] :

$$r[n] = \begin{cases} w[n], & H_0 \\ s[n]h[n] + w[n], & H_1 \end{cases} \quad (2)$$

Où,  $w[n]$ , représente un bruit blanc gaussien additif, et  $h[n]$  le gain de canal. Nous sommes, donc, en présence de deux hypothèses ;

$H_0$ , dénote l'hypothèse nulle, où le signal  $r[n]$  est seulement un bruit blanc gaussien, c.à.d.

$$H_0 : r[n] = w[n] \quad (3)$$

$H_1$  dénote l'hypothèse alternative, où le signal reçu  $r[n]$  est la somme d'un bruit blanc gaussien et d'un autre signal  $s[n]$  (qui peut être connu ou non), c.à.d.

$$H_1 : r[n] = s[n]h[n] + w[n] \quad (4)$$

La performance de la détection est caractérisée par la probabilité de détection ( $P_d$ ), et la probabilité de fausse alarme ( $P_f$ ).  $P_d$ , est la probabilité que la décision prise est  $H_1$  alors que  $H_1$  est effectivement vraie ;  $P_f$ , dénote la probabilité que la décision prise est  $H_1$  alors que c'est  $H_0$  qui est vraie. Sur la base de  $P_d$ , la probabilité de non détection  $P_m$  (miss-detection), peut être obtenue par  $P_m = 1 - P_d$ .

Il y a deux critères de test d'hypothèses de base dans ce genre de problèmes : le test de Neyman-Pearson (NP), et le test de Bayes. Le test NP vise à maximiser  $P_d$  (ou minimiser  $P_m$ ) sous la contrainte  $P_f \leq \alpha$ , où  $\alpha$  est la probabilité de fausse alarme maximale. Le test de Bayes minimise le coût moyen donné par :  $R = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^l C_{ij} \Pr(H_i|H_j) \Pr(H_i)$ , où  $C_{ij}$  est le coût de la déclaration de  $H_i$  lorsque  $H_j$  est vraie,  $\Pr(H_i)$  est la probabilité a priori de l'hypothèse  $H_i$  et  $\Pr(H_i|H_j)$  est la probabilité de déclarer  $H_i$  lorsque  $H_j$  est vraie. Les deux tests sont équivalents au test du ratio de vraisemblance (likelihood ratio test) donné par :

$$\Lambda(x) = \frac{P(x|H_1)}{P(x|H_0)} = \frac{P(x(1), x(2), \dots, x(M)|H_1)}{P(x(1), x(2), \dots, x(M)|H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \gamma \quad (5)$$

où  $P(x(1), x(2), \dots, x(M)|H_i)$  est la distribution des observations  $x = [x(1), x(2), \dots, x(M)]$  sous l'hypothèse  $H_i$ ,  $i \in \{0,1\}$ ,  $\Lambda(x)$  est le ratio de vraisemblance,  $M$  est le nombre d'échantillons, et  $\gamma$  est le seuil de détection qui est déterminé par la probabilité de fausse alarme maximale,  $\alpha$ , dans le test

NP, et  $\gamma = \frac{\Pr(H_0)(C_{10}-C_{00})}{\Pr(H_1)(C_{01}-C_{11})}$  dans le test Bayes.

### 3.1 Techniques de détection

Le problème de détection des OSRs peut, donc, se ramener à un test d'hypothèses, et être modélisé comme sus indiqué. Plusieurs techniques sont offertes pour l'implémentation d'un détecteur d'OSRs ; cependant, chacun des détecteurs correspondants adopte un critère de test d'hypothèse différent. Les techniques les plus utilisées dans la littérature, pour leur haut degré de maturité technologique, leur bas niveau de difficulté de conception, et leur facilité de réalisation [68] [69] sont : la détection d'énergie (energy detection), les filtre adaptés (matched filters), et la détection de traits cyclo-stationnaires (cyclostationary feature detection).

### 3.1.1 Détection de l'énergie (Energy detection)

La détection d'énergie est la plus répandue des techniques de captage de spectre, car elle est simple et requiert un niveau de complexité de traitement bas [9]. Elle consiste en le calcul de l'énergie d'un court temps d'observation du signal reçu, à l'intérieure de la bande d'intérêt, et sa comparaison avec

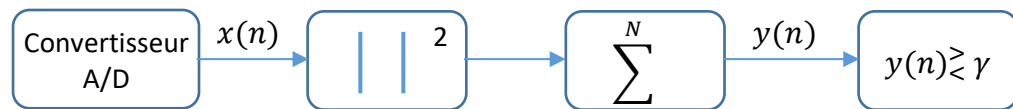


Figure 47 Diagramme de bloc détection d'énergie

un seuil  $\gamma$ . Le diagramme de bloc de la détection d'énergie est dessiné dans la Figure.47. Le signal est reçu par le convertisseur A/D, ensuite la sortie du convertisseur A/D  $x(n)$  est passée au circuit de lois carré et alimente le bloc de sommation/intégrateur. La sortie de l'intégrateur  $y(n)$  est comparée à un seuil prédéfini  $\gamma$ . Cette comparaison est utilisée pour découvrir la présence ou l'absence de signal d'UP [67]. Le calcul de l'énergie du signal d'entrée est effectué comme suit :

$$E = \sum_{n=1}^N |x(n)|^2 \quad (6)$$

Où,  $x(n)$  ( $n = 1,2,3... N$ ) est le signal reçu, et  $E$  est l'énergie calculée ou parfois dénotée  $y(n)$ .

### 3.1.2 Détection par filtre adapté (Matched filter detection)

Le filtre adapté représente, en général, la manière optimale de n'importe quelle détection de signal, puisqu'il permet de minimiser le ratio du signal au bruit (SNR), reçu. En plus, il requiert moins de temps pour réaliser un gain de traitement élevé, puisqu'on a besoin de seulement  $O(1/SNR)$  échantillons pour atteindre une contrainte de probabilité de détection donnée [9]. Cependant, il nécessite la démodulation du signal et donc des informations sur quelques paramètres des couches physique et MAC du signal, tels que le type et l'ordre de la modulation, le forme d'onde, le format de paquet. La détection par filtre adapté est, donc, utile seulement dans les cas où des informations

sur les UPs sont connus des radios cognitives (RCs). Le diagramme de bloc, de cette technique, est montré dans la Figure.48.

Ici, le signal d'entrée est reçu par le convertisseur A/D, et la sortie du convertisseur A/D est multipliée par un signal d'information préalable  $x_p^*(n)$ . Ensuite, le signal de la multiplication alimente le bloc de sommation et enfin, la sortie du filtre adapté  $y(n)$  est comparée à un seuil pour déterminer la présence ou absence de signal d'UP. L'expression mathématique de la détection par filtre adapté

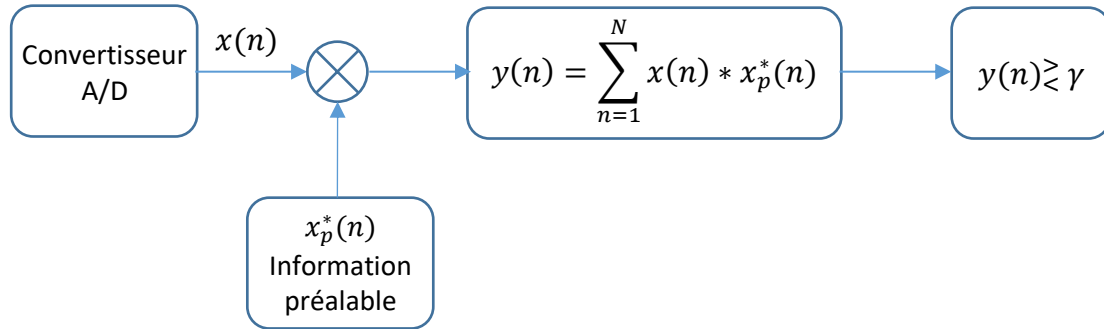


Figure 48 Détection par filtre adapté

est  $y(n)$  de Figure.48, où,  $x(n)$  ( $n = 1,2,3, \dots, N$ ) est le signal transmit,  $x_p^*(n)$  le signal conjugué du signal pilot connu,  $y(n)$  le signal reçu.

### 3.1.3 Détection de trait cyclo-stationnaire (cyclostationary feature detection)

C'est une des techniques qui exploite la nature cyclo-stationnaire d'un trait du signal pour la détection de la présence (ou absence) du dit signal. Elle peut être réalisée en analysant la fonction d'autocorrélation cyclique (FAC) du signal reçu,  $x(n)$ , exprimée comme [70] :

$$R_x^{(\beta)}(\tau) = E[x(t)x^*(t - \tau)e^{-j2\pi\beta t}] \quad (7)$$

Où  $E[.]$  est l'opérateur espérance,  $x^*$  dénote la conjugué complexe de  $x$ , et  $\beta$  est la fréquence cyclique. La FAC peut aussi être représentée par son développement en séries de Fourier, appelée fonction de densité de spectre cyclique (DSC), dénotée comme :

$$S(f, \beta) = \sum_{\tau=-\infty}^{+\infty} R_x^{(\beta)}(\tau)e^{-j2\pi f\tau} \quad (8)$$

La fonction DSC présente des pics lorsque la fréquence cyclique,  $\beta$ , est égale aux fréquences fondamentales du signal transmit. Sous l'hypothèse  $H_0$ , la fonction DSC n'a aucun pic puisque le bruit est, en général, non cyclo-stationnaire.

## 3.2 Captage/Surveillance de spectre dans I-CRICNet

Comme déjà mentionné, les techniques de captage/surveillance de spectre dans les réseaux radios-cognitives peuvent être classifiées (sur la base de la largeur de la bande d'intérêt) en classe de captage bande-étroite et classe de captage large-bande [71]. Le captage/surveillance bande-étroite s'intéresse au problème de décider si une tranche particulière d'un spectre est un trou ou non. Au contraire, le captage de spectre large-bande est basé sur la classification de tranches individuelles d'une large bande en tranches occupées ou vacantes. Il y va de soi, que les deux procédures de captage sont requises durant un cycle cognitif [71]. Nous devons insister sur le fait qu'il y a deux phases distinctes pour la détection de la présence d'UPs. Durant la phase initiale de captage, un captage large-bande est mené pour détecter les trous spectraux disponibles. Après la détection et l'analyse des trous spectraux, la sélection-de-spectre sélectionne la meilleure bande selon un certain critère. Une fois une fréquence opératoire convenable choisie, les communications peuvent commencer ; mais à cause des dynamiques élevées de l'environnement mobile, la bande étroite sélectionnée pourrait, entre temps, être réoccupée par un UP. Par conséquent, avant le début des communications, un captage bande-étroite est exécuté pour la bande sélectionnée (par US) comme une seconde phase de captage pour confirmer qu'aucun UP n'est présent. Au cours de l'utilisation de la bande, un captage continu du spectre est nécessaire pour s'assurer que la bande utilisée est encore inoccupée et que l'US peut continuer sa communication dans la même bande.

Dans cette section, nous allons présenter une technique, possible, de captage/surveillance de spectre adapté à I-CRICNet. Le contexte y est un peu particulier, en ce sens que I-CRICNet est un système NC-OFDM, c.à.d. qu'il considère le spectre sous forme de sous-porteuses adjacentes dont certaines sont libres alors que d'autres non. La conséquence directe en est que la décision quant à la vacance (ou l'occupation) par un UP va concerner chaque sous-porteuse, et non pas toute la bande, à la fois.

### 3.2.1 Schéma de détection des OSRs pour I-CRICNet

Il a été déjà mentionné que dans notre proposition la BOA est toujours exploitée avec la technologie d'accès NC-OFDM, quelle que soit la TAR de la bande (sous licence) courante. En d'autres termes, la BOA est considérée, au niveau de la SBC, comme étant divisée, dans le domaine fréquentiel, en un nombre paramétrique de sous-porteuses et structurée, dans le domaine temporel, en trames de

durées paramétriques aussi. La question clé que nous abordons dans cette section est, alors, de savoir comment pourrait être implémentée (concrètement) la primitive  $I_c(\text{further\_information})$ , dans les scénarios où les primitive  $S_c$ , seules, sont insuffisantes pour rapporter et détecter les OSRs (c.à.d. les

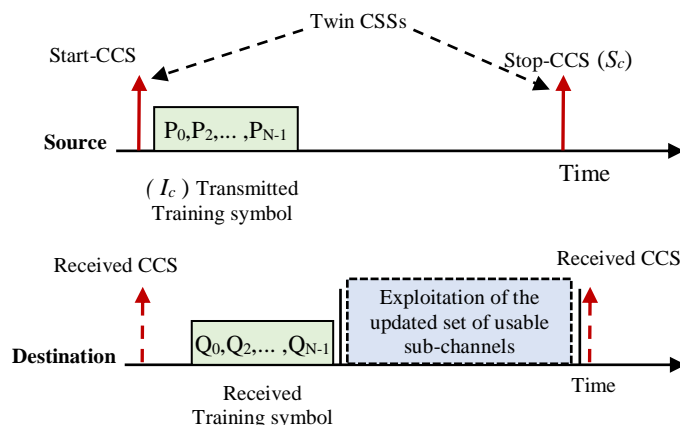


Figure 49 Déroulement chronologique de la notification de détection

trous spectraux). Ce que nous proposons sert à présenter une manière d'arriver au but, et montrer ainsi la faisabilité de ce que nous avançons [72]. La Figure.49 montre le déroulement chronologie de la notification et de la détection des OSRs pour de tels scénarios et met en évidence le rôle des primitives  $I_c$  et  $S_c$ .

### 3.2.2 Modèle de spectre

Nous adoptons, avec une légère mais importante modification, le modèle de canal à deux interrupteurs (two-switch channel model) utilisé dans [58] et [73] pour modéliser l'état des sous-canaux, dans les sous-bandes d'un système RC basé sur la technologie NC-OFDM. Dans ce modèle, l'interrupteur est ouvert lorsqu'un UP est détecté dans le sous-canal, et fermé sinon (Figure.46). Une première différence (légère) dans notre modèle, cependant, est la supposition que les sous-porteuses composant la bande de spectre sont groupées en sous-canaux physiques (sous-canaux PHY) d'un nombre égal de sous-porteuses. Ces sous-canaux PHY sont les unités d'allocation des ressources radios (dans une trame) dans les systèmes, traditionnels, basés sur la technologie OFDM ("slots" dans les réseaux WiMAX et "resource blocks" dans les réseaux LTE) [74]. Par conséquent, les sous-canaux ouverts et fermés du modèle double-interrupteur sont composés de sous-canaux physiques (Figure.50). Le rôle de la primitive  $I_c(\text{further\_information})$  est, alors, de synchroniser les interrupteurs situés du côté de la source avec ceux du côté de la destination.

Nous dénotons l'état des interrupteurs côté source et destination de la primitive  $I_c$  par  $S$  et  $D$

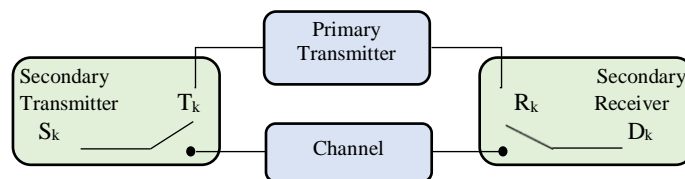


Figure 50 Modèle double interrupteur du  $k^{\text{ième}}$  canal

respectivement, où  $S = [S_0, S_1, \dots, S_{N-1}]$ ,  $D = [D_0, D_1, \dots, D_{N-1}]$ , et  $N$  est le nombre total de sous-porteuses. Nous avons :

$$S_k = \begin{cases} 1, & k \in \{a_1, a_2, \dots, a_{N_S}\} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

et

$$D_k = \begin{cases} 1, & k \in \{b_1, b_2, \dots, b_{N_D}\} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

$S_k = 1$ , indique que la  $k^{\text{ième}}$  sous-porteuse est libre, et  $S_k = 0$  indique que la  $k^{\text{ième}}$  sous-porteuse est occupée. De même  $D_k = 1$ , indique que la  $k^{\text{ième}}$  sous-porteuse est considérée comme libre, du côté destinataire, et  $D_k = 0$  indique que la  $k^{\text{ième}}$  sous-porteuse est considérée comme occupée. L'ensemble  $\{a_1, a_2, \dots, a_{N_S}\}$ , est l'ensemble des indexes des  $N_S$  sous-porteuses libres que la source veut signaler à la destination. De même, l'ensemble  $\{b_1, b_2, \dots, b_{N_D}\}$ , est l'ensemble des indexes des  $N_D$  sous-porteuses considérées comme libres du côté du destinataire. Les états  $S$  et  $D$  des interrupteurs sont dits synchronisés si  $S_k = D_k$  quel que soit  $k$ , c.à.d.  $S = D$ .

### 3.2.3 Schéma de synchronisation

La chronologie des transmissions générées pour signaler et détecter les OSRs est illustrée dans Fig.46. D'abord, il est montré que la *Start - CSS* annonce l'arrivée d'une symbole d'entraînement,  $P$ , composée d'une séquence de symboles OFDM  $P_0, P_1, \dots, P_{N-1}$ . En fait, cette séquence transporte l'information qui permettra la synchronisation des interrupteurs. De plus, le résultat de la détection,  $Q$ , pourra être différent du symbole d'entraînement effectivement transmit. Il faut insister ici sur le fait que, ce n'est que lorsque le récepteur de la destination détecte une *Start - CSS* qu'il pourra procéder à la détection du symbole d'entraînement lui-même. Nous soulignons ce point car c'est la seconde différence entre le modèle de [58] et le nôtre. Une autre différence concerne les deux probabilités associées aux *SCCs*, à savoir la probabilité de détection ( $r_d$ ) d'une *SCC* et la "false alarm" ( $r_f$ ).

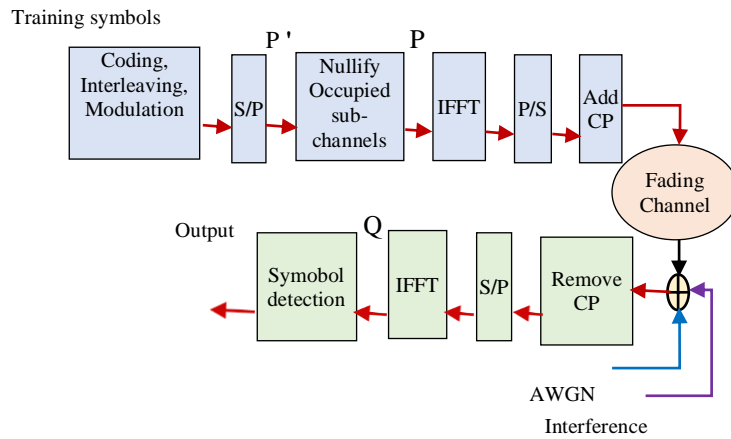


Figure 51 Diagramme de bloc de la NC-OFDMA

Un diagramme de bloc mettant en évidence les étapes clé dans un système de communication NC-OFDM est montré dans Figure.51. L'encodage et le décodage sont effectués dans le domaine fréquentiel, où  $P'$ ,  $P$ , et  $Q$  contiennent, chacun, des symboles NC-OFDM (un symbole par sous-porteuse). Le symbole d'entraînement effectif  $P'$ , connu par la source et la destination, est représenté dans le domaine fréquentiel par un vecteur de symboles pilotes :

$$P' = [P'_0, P'_1, \dots, P'_{N-1}] \quad (11)$$

Puisque en mode secondaire nous sommes tenu de protéger les UPs des interférences des USs, les sous-porteuses qui se recouvrent avec le spectre des UPs sont désactivées, empêchant ainsi leur utilisation. Les symboles pilotes qui correspondent aux sous-porteuses inactives sont tout simplement écartés et le reste des sous-porteuses sont utilisées pour transmettre le reste des symboles pilotes. Ce qui est injecté dans le module IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) n'est pas le symbole  $P'$ , mais  $P$ , écrit comme:

$$P = [P_0, P_1, \dots, P_{N-1}] \quad (12)$$

Où

$$P_k = P'_k S_k = \begin{cases} P'_k, & k \in \{a_1, a_2, \dots, a_{N_S}\} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad \text{pour la sous-porteuse } k \quad (13)$$

Pour utiliser une seule large bande radio au lieu de  $N$  bandes étroites indépendantes, les sous-porteuses sont modulées en utilisant une opération IFFT. Le symbole  $P$  est transformé en utilisant une opération IFFT, les valeurs complexes de sortie sont reconverties en symboles en série, un préfixe

cyclique (PC) est ajouté pour prévenir les interférences inter-symbole (ISI inter-symbol interference), et les symboles résultants sont envoyés en série à travers le canal large-bande.

A la réception, le préfixe cyclique est écarté, et les  $N$  symboles en série sont reconvertis en  $N$  streams parallèles. Les symboles reçus sont démodulés en utilisant une opération FFT, qui résulte en  $N$  symboles pilotes, chacun de la forme :

$$Q_k = \begin{cases} P_k H_k + W_k, & k \in \{a_1, a_2, \dots, a_{N_S}\} \\ I_k + W_k, & \text{else} \end{cases} \quad \text{pour la sous - porteuse } k \quad (14)$$

Où

$Q_k, P_k, H_k$  sont le symbole pilote reçu, le symbole pilote transmit, et la réponse canal dans le domaine fréquentiel pour la sous-porteuse  $k$ , respectivement.  $I_k$ , est le signal complexe d'interférence des UPs.  $W_k$ , est le bruit blanc Gaussien complexe sur la  $k$ ème sous-porteuse, de moyenne zéro et de variance  $\sigma_n^2$  par dimension [58].

Dans le récepteur de la destination, la détection des sous-canaux libres (sous-porteuses) est dérivée à partir des probabilités à posteriori (PAPs) des sous-canaux libres, sur la base du symbole d'entraînement reçu et des probabilités de détection et de fausse alarme de la  $S_c$ -CSS. C'est la troisième différence entre notre modèle et le modèle dans [58].

Nous supposons que l'interférence à partir d'un UP ( $I_k$ ) sur chaque sous-canal occupé à une distribution complexe gaussienne de moyenne zéro et de variance  $\sigma_p^2$  par dimension. Une variable aléatoire binaire  $C$ , est introduite pour enregistrer si oui ou non une  $S_c$ -CSS a été détectée, où :

$$C = \begin{cases} 1, & \text{a Start - CCS } (S_c) \text{ has been detected} \\ 0, & \text{no CCS } (S_c) \text{ has been detected} \end{cases} \quad (15)$$

Etant donné le symbole reçu  $Q_k$ , et les valeurs de  $C$ , la probabilité a posteriori (PAP) de  $S_k$  est dénotée par  $P(S_k = 1|C = 1, Q_k)$ . Nous avons :

$$\begin{aligned} P(S_k = 1|C = 1, Q_k) &= \frac{P(S_k = 1|C = 1, Q_k)}{P(S_k = 1|C = 1, Q_k) + P(S_k = 0|C = 1, Q_k)} \\ &= \frac{P(S_k = 1|C = 1, Q_k)/P(S_k = 0|C = 1, Q_k)}{P(S_k = 1|C = 1, Q_k)/P(S_k = 0|C = 1, Q_k) + 1} \\ &= \frac{\exp(\Lambda_k)}{\exp(\Lambda_k) + 1} \end{aligned} \quad (16)$$

où

$$A_k = \ln \frac{P(S_k = 1|C = 1, Q_k)}{P(S_k = 0|C = 1, Q_k)} \quad (17)$$

l'application des règles de Bayes donne :

$$A_k = \ln \frac{\rho(Q_k|C = 1, S_k = 1)P(S_k = 1|C = 1)}{\rho(Q_k|C = 1, S_k = 0)P(S_k = 0|C = 1)} \quad (18)$$

$$= \ln \left\{ \frac{\rho(Q_k|C = 1, S_k = 1)P(S_k = 1) r(C = 1|S_k = 1)}{\rho(Q_k|C = 1, S_k = 0)P(S_k = 0) r(C = 1|S_k = 0)} \right\} \quad (19)$$

Où  $\rho(Q_k|C = 1, S_k = 1), \rho(Q_k|C = 1, S_k = 0)$  sont les fonctions de densité de probabilité conditionnelle (DPFs) de  $Q_k$  pour  $(C = 1 \text{ and } S_k = 1)$  et  $(C = 1 \text{ and } S_k = 0)$ , respectivement.  $P(S_k = 1), P(S_k = 0)$  sont les probabilités a priori de  $S_k = 1$  et  $S_k = 0$ , respectivement.  $r(C = 1|S_k = 1), r(C = 1|S_k = 0)$ , sont les probabilités conditionnelles de  $C = 1$ , pour  $S_k = 1$  et  $S_k = 0$ , respectivement. Le terme  $r(C = 1|S_k = 1)$  dans (19) signifie que nous avons au moins une sous-porteuse libre ( $S_k = 1$ ) et, donc, sommes sûr qu'une  $S_c - CSS$  a été transmise ; elle va être donc détectée avec une probabilité  $r_d$ , par le récepteur de la destination. Le terme  $r(C = 1|S_k = 0)$  dans (19) a une signification différente ; il nous dit que nous avons au moins une sous-porteuse occupée ( $S_k = 0$ ), c.à.d. qu'ou bien toutes les sous-porteuses restantes sont, aussi, occupées ou bien qu'il y a au moins une sous-porteuse parmi elles qui est libre. De la première supposition nous concluons qu'il y aura une fausse alarme d'une  $S_c - CSS$ , avec une probabilité  $r_f$ , alors que de la dernière supposition nous concluons qu'il y aura une détection d'une  $S_c - CSS$ , avec une probabilité  $r_d$ . La probabilité totale est donc égale à  $r_d + r_f$ . Par conséquent nous obtenons :

$$\begin{aligned} \frac{r(C = 1|S_k = 1)}{r(C = 1|S_k = 0)} &= \frac{r_d}{r_d + r_f} \\ &= \frac{1}{r_f/r_d + 1} \end{aligned} \quad (20)$$

En substituant (20) dans (19) nous obtenons

$$A_k = \ln \left\{ \frac{\rho(Q_k|C = 1, S_k = 1)P(S_k = 1)}{\rho(Q_k|C = 1, S_k = 0)P(S_k = 0)} \frac{1}{r_f/r_d + 1} \right\} \quad (21)$$

Afin de détecter correctement les symboles pilotes, l'information sur l'état du canal (CSI channel state information), i.e.  $H_k$ , est requise du côté du récepteur de la destination. En admettant une CSI idéale nous dérivons :

$$\rho(Q_k|C = 1, S_k = 1) = \frac{1}{2\pi\sigma_n^2} \exp\left\{-\frac{|Q_k - H_k P'_k|^2}{2\sigma_n^2}\right\} \quad (22)$$

et

$$\rho(Q_k|C = 1, S_k = 0) = \frac{1}{2\pi\sigma_I^2} \exp\left\{-\frac{|Q_k|^2}{2\sigma_I^2}\right\} \quad (23)$$

$$\text{respectivement, où } \sigma_I^2 = \sigma_p^2 + \sigma_n^2 \quad (24)$$

Pour revisiter  $\Lambda_k$ , on substitue (22) et (23) dans (19) et obtenons

$$\Lambda_k = \ln \frac{P(S_k = 1)}{1 - P(S_k = 1)} + \ln \frac{1}{r_f/r_d + 1} + \ln \frac{\sigma_I^2}{\sigma_n^2} + \frac{|Q_k|^2}{2\sigma_I^2} - \frac{|Q_k - H_k P'_k|^2}{2\sigma_n^2} \quad (25)$$

Enfin, substituant (25) dans (16), nous obtenons  $P(S_k = 1|C = 1, Q_k)$ .

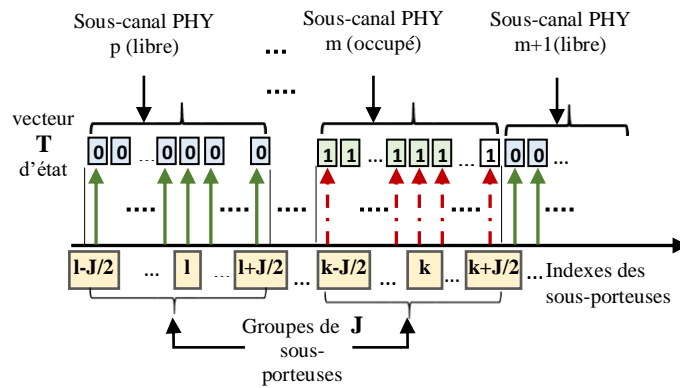


Figure 52 Configuration physique des canaux de la BOA

Dans [58], il est souligné que calculer la PAP avec un seul symbole  $Q_k$  est sujet aux erreurs, dues à la nature aléatoire du bruit et des interférences. La justesse de la PAP de  $S_k$  est améliorée en prenant en compte les sous-porteuses adjacentes, supposées avoir le même état. La PAP est calculée comme  $P(S_k = 1|C = 1, \mathbf{A}_k)$ , au lieu de  $P(S_k = 1|Q_k)$ , où  $\mathbf{A}_k = [Q_{k-J/2}, \dots, Q_k, \dots, Q_{k+J/2}]$  est le sous-ensemble consistant en le symbole  $Q_k$  et les  $J$  symboles reçus qui lui sont adjacents. Il faut souligner que les  $J - 1$  sous-porteuses adjacentes (à la  $k$ ème sous-porteuse) n'ont pas nécessairement le même état. Par conséquent, il y a une incertitude (dans ce modèle) quant aux limites entre les sous-porteuses occupées et celles qui sont libres. Ceci n'est pas le cas dans notre modèle (Figure.52). Comme on peut le voir, les sous-porteuses composant la bande de fréquence sont groupées en canaux physiques (sous-canaux PHY) d'un nombre égale de sous-porteuses ( $J$ ), de même état, car elles sont allouées (ou libérées) ensembles. Ce détail est à ajouter, aussi, aux particularités de notre modèle.

De manière similaire, nous allons améliorer la justesse de la PAP de  $S_k$ , en prenant en compte toutes les sous-porteuses du cana PHY contenant la  $k$ ème sous-porteuse. La  $k$ ème sous-porteuse est toujours choisie au milieu du sous-canal PHY, pour servir d'informatrice. Intuitivement, la position du milieu est la plus éloignée des deux bords du sous-canal PHY et, par suite, est la moins affectée

par les deux sous-canaux PHY voisins en cas où ils sont occupés par des UPs. Nous exprimons  $P(S_k = 1|C = 1, \mathbf{A}_k)$  comme :

$$P(S_k = 1|C = 1, \mathbf{A}_k) = \frac{\exp(\Lambda'_k)}{\exp(\Lambda'_k) + 1} \quad (26)$$

où

$$\begin{aligned} \Lambda'_k &= \ln \frac{\rho(\mathbf{A}_k|C = 1, S_k = 1)P(S_k = 1|C = 1)}{\rho(\mathbf{A}_k|C = 1, S_k = 0)P(S_k = 0|C = 1)} \\ &= \ln \left\{ \frac{\rho(\mathbf{A}_k|C = 1, S_k = 1)P(S_k = 1)}{\rho(\mathbf{A}_k|C = 1, S_k = 0)P(S_k = 0)} \frac{r_d}{r_f/r_d + 1} \right\} \\ &= \ln \frac{P(S_k = 1)}{1 - P(S_k = 1)} + \ln \frac{1}{r_f/r_d + 1} + \ln \frac{\prod_{m=k-j/2}^{k+j/2} \rho(Q_m|C = 1, S_m = 1)}{\prod_{m=k-j/2}^{k+j/2} \rho(Q_m|C = 1, S_m = 0)} \\ &= \ln \frac{P(S_k = 1)}{1 - P(S_k = 1)} + \ln \frac{1}{r_f/r_d + 1} + \sum_{m=k-j/2}^{k+j/2} \left\{ \ln \frac{\sigma_I^2}{\sigma_n^2} + \frac{|Q_m|^2}{2\sigma_I^2} - \frac{|Q_m - H_m P'_m|^2}{2\sigma_n^2} \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

Finalement, le récepteur de la destination doit se prononcer sur les sous-porteuses libres. A cette fin, une valeur seuil  $TH_{\Lambda'}$ , ou  $TH_{APP}$  est donnée et la décision est prise avec  $\Lambda'_k$  ou  $P(S_k = 1|C = 1, \mathbf{A}_k)$  donnant :

$$D_k = \begin{cases} 1, & \text{if } \Lambda'_k \geq TH_{\Lambda'} \text{ or } P(S_k = 1|C = 1, \mathbf{A}_k) \geq TH_{APP} \\ 0, & \text{if } \Lambda'_k < TH_{\Lambda'} \text{ or } P(S_k = 1|C = 1, \mathbf{A}_k) < TH_{APP} \end{cases} \quad (28)$$

### 3.2.4 Performance du schéma de décision

Dans cette section, nous allons suivre [58] dans la dérivation de la distribution de  $\Lambda'_k$ , mais pour les sous-canaux libres uniquement, ainsi que l'évaluation des probabilités de détection et de fausse alarme pour le schéma proposé. De la configuration montrée dans Figure.48, et de (27) nous avons :

$$\begin{aligned} \Lambda'_k &= \ln \frac{P(S_k = 1)}{1 - P(S_k = 1)} + \ln \frac{1}{r_f/r_d + 1} + \sum_{m=k-j/2}^{k+j/2} \left\{ \ln \frac{\sigma_I^2}{\sigma_n^2} + \frac{|Q_m|^2}{2\sigma_I^2} - \frac{|Q_m - H_m P'_m|^2}{2\sigma_n^2} \right\} \\ &= \sum_{m=k-j/2}^{k+j/2} \frac{|Q_m|^2}{2\sigma_I^2} - \sum_{m=k-j/2}^{k+j/2} \frac{|Q_m - H_m P'_m|^2}{2\sigma_n^2} + const, \end{aligned}$$

$$= \left( \frac{\sigma_n^2}{2\sigma_I^2} - \frac{1}{2} \right) \sum_{m=k-j/2}^{k+j/2} \frac{|W_m|^2}{\sigma_n^2} + \sum_{m=k-j/2}^{k+j/2} R_e \left\{ \frac{W_m P'_m H_m^*}{\sigma_I^2} \right\} + const ,$$

où  $R_e \left\{ \frac{W_m P'_m H_m^*}{\sigma_I^2} \right\}$  denote la partie réelle du nombre complexe  $\left\{ \frac{W_m P'_m H_m^*}{\sigma_I^2} \right\}$  et  $P'_m$  et  $H_m^*$  sont les nombres conjugués de  $P'$  et  $H_m$ , respectivement. On peut écrire  $\Lambda'_k$  comme :

$$\Lambda'_k = \left( \frac{\sigma_n^2}{2\sigma_I^2} - \frac{1}{2} \right) C_1 + C_2 + const \quad (29)$$

où

$$C_1 = \sum_{m=k-j/2}^{k+j/2} \frac{|W_m|^2}{\sigma_n^2} ,$$

$$C_2 = \sum_{m=k-j/2}^{k+j/2} R_e \left\{ \frac{W_m P'_m H_m^*}{\sigma_I^2} \right\} .$$

On supposant que  $W_m$  est une distribution Gaussienne complexe nous concluons que  $C_1$  est une variable aléatoire qui suit une distribution chi-carré avec  $2(j+1)$  degrés de liberté, alors que  $C_2$  est une variable aléatoire qui suit une distribution normale comme  $(0, (j+1)|H_m P'_m|^2 \sigma_n^2 / \sigma_I^4)$ . Par ailleurs,  $\Lambda'_k$  pourrait être représenté sous la forme :

$$\Lambda'_k - const = \left( \frac{\sigma_n^2}{2\sigma_I^2} - \frac{1}{2} \right) C_1 + fZ_0 \quad (30)$$

où  $Z_0$  est une variable aléatoire avec une distribution normale standard et

$$f = \sqrt{(j+1)|H_m P'_m|^2 \sigma_n^2 / \sigma_I^4}$$

De la distribution de (30) nous pouvons dériver la probabilité de non détection (miss probability) et de fausse alarme comme :

$P_m = P(\Lambda'_k < TH_{\Lambda'} | S_k = 1)$ , et  $P_f = P(\Lambda'_k > TH_{\Lambda'} | S_k = 0)$ , respectivement.

### 3.3 Détection de spectre coopérative dans I-CRICNet

Des travaux (beaucoup) [75] sur le captage/surveillance de spectre dans les RRCs ont mis en évidence l'apport de la détection coopérative en termes d'amélioration des performances, du fait de sa

résilience à l'évanouissement par trajets multiples (multipath fading). Dans la détection de spectre coopérative, la décision finale quant à la présence (ou non) d'un trou spectral résulte de la prise en compte de plusieurs décisions (ou rapports) locales, indépendantes. La perspective d'un gain de performances nous a décidés à envisager la coopération dans notre schéma de détection présenté dans la section.3.2.1.2. Derrière cette décision, il y avait aussi le besoin de connaître dans quelle mesure notre schéma était-il adaptable à l'ajout d'un niveau de coopération, sans qu'il soit lui-même remis en cause. Assurément, les stratégies de coopérations proposées dans la littérature [68] [76] ne sont pas faites pour fonctionner, telles quelles, dans un contexte tel que le nôtre, bien qu'elles soient d'un intérêt certain. Ce constat nous a conduits à essayer une extension souple de notre schéma, qui s'inspire de ces stratégies, pour introduire la coopération en tant qu'option. Nous espérons, ainsi, améliorer les performances de notre propre schéma sans avoir besoin d'en modifier les principes directeurs, ou de changer l'architecture de départ de I-CRICNet.

### 3.3.1 Détection de spectre coopérative traditionnelle

Dans un schéma de détection coopérative, chaque US effectue de manière indépendante sa propre détection locale c.à.d. essaye de capter la présence d'un UP par lui-même, pour ensuite partager sa décision locale avec un centre de fusion (CF) qui prendra la décision globale. Le CF combine les décisions locales collectées en utilisant une règle de fusion, telle que OU, ET, ou la règle de la majorité [77]. Le processus de captage de spectre coopératif se déroule en deux phases consécutives, à savoir, la phase de captage où chaque US effectue, par lui-même, un captage local, et la phase

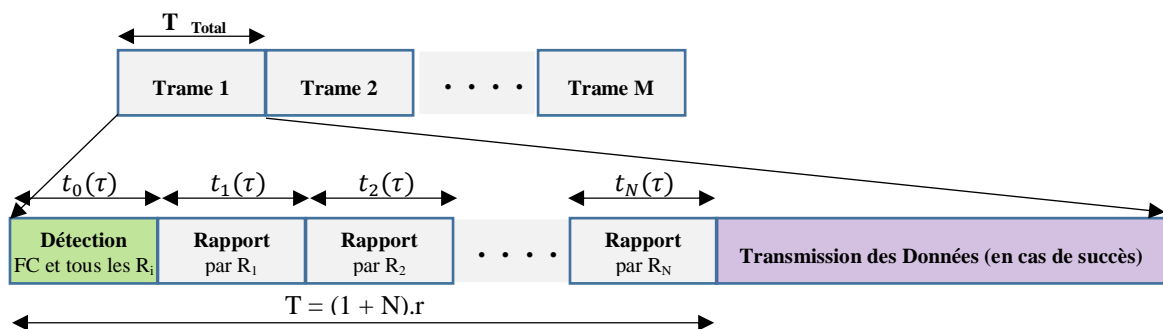


Figure 53 Déroulement processus de captage coopératif

d'envoi de rapports où chaque US partage sa décision locale avec le CF en vue la décision globale. Concrètement, les USs sont supposés (communément dans les travaux existants) opérer selon la manière d'accès TDMA, où chaque trame MAC est composée de deux durées consécutives appelées phase de captage et phase de transmission. Au début de chaque trame MAC et durant la phase de captage, la stratégie de détection est périodiquement exécutée. De plus, la phase transmission qui suit est la même qu'une transmission de paquet. Comme dans [68] [76], chaque phase de captage consiste

en plusieurs sous-lapses de temps utilisés pour la détection de signal ou l'envoi de rapport de décision. Sur la Figure.53, on peut remarquer que les sous-lapses de temps de captage dénotés par  $\{t_0, t_1, \dots, t_N\}$  sont égaux, et ont une même durée  $\tau$  dans la stratégie traditionnelle.

Dans la stratégie traditionnelle, tous les USs détectent d'abord l'état du canal, indépendamment, durant  $t_0$ , ensuite chaque US coopérant envoie sa décision locale de 1-bit au CF durant  $\{t_1, \dots, t_i, \dots, t_N\}$  où  $R_i (i = 1, \dots, N)$  envoie seulement durant  $t_i$ . Une des méthodes d'envoi et de réception des décisions [68] consiste à encoder la décision locale avec un code de redondance cyclique (CRC) puis à envoyer le signal indicateur encodé par le CRC au CF où le contrôle CRC est effectué. Finalement, seuls les envois décodés avec succès seront utilisés pour la fusion, par la règle OU par exemple. Typiquement, lorsque le CF prend la décision globale il devrait diffuser un message contenant l'information sur l'état de présence d'un UP pour le notifier aux USs. Cependant, les détails de cette notification ne sont pas traités dans les travaux que nous avons examinés, qui en général se limite à la détection.

La stratégie traditionnelle a comme inconvénient majeur de consommer beaucoup de temps lorsque le nombre d'USs coopérants est grand. Cela est dû au fait que tous les USs, sont tenus d'envoyer au CF un rapport sur leurs décisions locales. Une conséquence directe de ce constat, est un délai plus long pour la prise de décision finale, d'où un coût de captage additionnel et une augmentation de la consommation d'énergie. Une dégradation des performances des USs (en termes de débit) s'ensuit nécessairement à cause de la réduction du temps de transmission accordé à ces USs.

### 3.3.2 Détection de spectre coopérative sélective supérieure (DCSS)

Pour éviter les inconvénients de la situation précédente, des stratégies alternatives ont été proposées. Elles consistent à réduire le nombre de USs autorisés à participer à la coopération. Une manière d'y arriver est d'opérer une sélection des USs qui vont coopérer pour en choisir un sous-ensemble permettant la meilleure performance en matière de détection ; c'est la stratégie de détection coopérative sélective. Cependant, une fois cette sélection effectuée tous les USs sélectionnés doivent envoyer leurs rapports au CF, ce qui laisse subsister un délai de détection non négligeable. D'autres stratégies de détection coopératives sélectives ont poussé la sélection à l'extrême en ne laissant qu'un US au plus envoyer sa décision locale au CF ; c'est les stratégies de détection coopératives sélectives supérieures (DCSS) [76]. Grâce à ces stratégies, une réduction significative du temps de captage est obtenue, par rapport aux stratégies traditionnelles.

La structure temporelle de la trame de la détection coopérative sélective proposée est illustrée dans

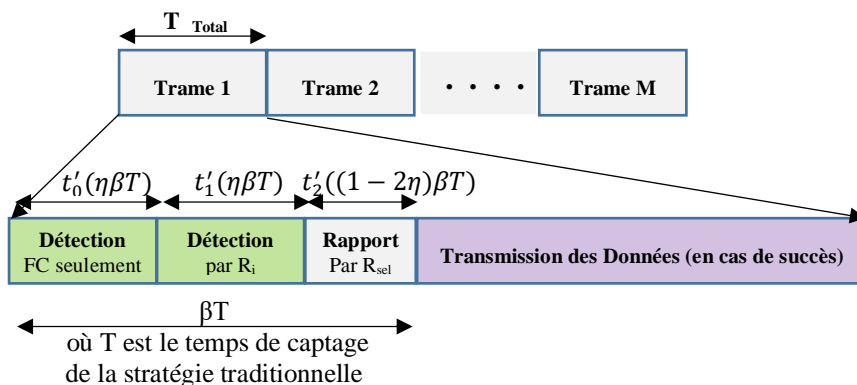


Figure 54 Détection de spectre coopérative sélective supérieure

la Figure.54, où seulement une fraction  $\beta$  ( $0 < \beta \leq 1$ ) du temps de captage  $T$  est utilisée à chaque phase de détection, comparée au cas traditionnel. Ensuite, chaque phase de captage de la stratégie proposée est divisée encore en trois sous-lapses de temps  $\{t'_0, t'_1, t'_2\}$ . Alors que  $t'_0$  et  $t'_1$  occupent chacun  $\eta\beta T$  ( $0 < \eta < 0.5$ ),  $t'_2$  occupe le reste  $(1 - 2\eta)\beta T$ .

Comme illustré dans Figure.54, le schéma de détection a deux paramètres  $\eta$  et  $\beta$  [68]. Dans une trame donnée d'une durée de  $T_{Total}$  secondes, le CF effectue un captage pour une durée de  $t'_0$  secondes. Si la décision du CF est en faveur de l'hypothèse de la présence d'un UP, alors, le CF diffuse un message de notification, en ce sens, aux autres USs leur signifiant que la durée  $T_{Total} - t'_0$  de la trame ne sera pas utilisée pour la communication opportuniste. Dans ce cas, aucune coopération de la part des autres USs n'est demandée. Dans le cas où la décision du CF est en faveur de l'absence d'un UP, il demande aux autres USs  $R_1, \dots, R_N$  d'effectuer, de manière indépendante, un captage pour une durée de  $t'_1$ . Le sous-ensemble des USs dont la décision conforte celle du CF constitue l'ensemble de détection. Si l'ensemble de détection est vide, alors tous les USs restent silencieux durant  $t'_2$ . Sinon, un seul, parmi les USs de cet ensemble, sera sélectionné pour l'envoi de sa décision au CF, durant  $t'_2$ . Cet US est appelé US supérieur. La sélection de l'US supérieur peut se faire de plusieurs manières. [76], propose deux stratégies appelées "Random Selection Reporting" (RSR) et "Best Selection Reporting" (BSR) respectivement. Les deux stratégies opèrent la sélection sur la base des différences des délais d'expirations de compteurs d'abstention indépendants (back-off timers), initialisés par chacun des USs de l'ensemble de détection. Le US dont le délai d'abstention expire le plus tôt, enverra le premier sa décision locale au CF durant  $t'_2$ . Les autres USs coopérants vont s'abstenir dès qu'ils entendent un autre US coopérant envoyer son rapport. En effet, tant que leurs compteurs n'ont pas expirés, tous les USs coopérants se mettent à l'écoute pour savoir si, entre temps, un des leurs n'a pas déjà envoyé son rapport.

Dans la stratégie RSR, chaque US coopérant,  $R_i$ , maintient un compteur d'abstention (back-off) initialisé à la valeur  $V_{1,i} = w_1/g_i$ , où  $w_1$  est une constante et  $g_i$  est une variable aléatoire exponentielle de paramètre 1. Dans la stratégie BSR, chaque US coopérant,  $R_i$ , maintient un compteur d'abstention (back-off) initialisé à la valeur  $V_{2,i} = w_2/\gamma_{R_i}|h_{R_iS}|^2$ , où  $w_2$  est une constante, et  $\gamma_{R_i}$  est le SNR de transmission de l'US  $R_i$ , et  $h_{R_iS}$  est le coefficient d'évanouissement du canal liant  $R_i$  au CF. L'US supérieur est dans ce cas, celui qui cause le plus haut SINR au CF.

La procédure de captage coopératif dans le cadre du schéma qui vient d'être décrit est présentée dans la Figure.55.

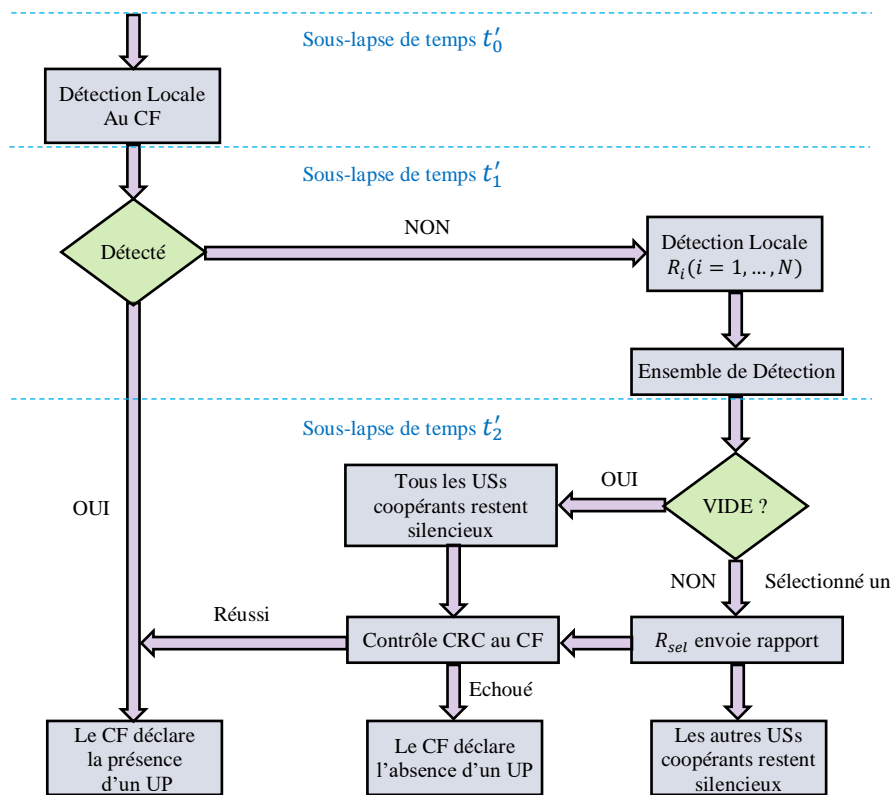


Figure 55 Organigramme de la détection coopérative sélective supérieure

### 3.3.3 Détection de spectre coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet

Envisager la DCSS dans le contexte de notre réseau I-CRICNet soulève, d'emblée, les points critiques suivants :

- Il ne s'agit plus de prendre une décision sur l'état global (occupé ou libre) d'une large bande de spectre, mais de l'état de chaque canal (ou sous-porteuse) constituant cette bande de spectre. La raison en est que la bande en question contient maintenant des portions libres et d'autres occupées.

- Il est donc hors de question de demander à chaque US coopérant de capter tous les canaux (ou sous-porteuses) de la bande de manière séquentielle, comme c'est préconisé par les stratégies sélectives présentées ci-dessus (rappelons que c'est la technique de détection d'énergie qui est utilisée) ; c'est très coûteux et pas performant.
- Si on ajoute à cela l'absence de connaissance préalable de la structure de la bande à capter, la question se complique davantage, car on devrait, alors, capter la bande canal par canal (ou sous-porteuse par sous-porteuse).
- Les deux derniers points suggèrent deux impératifs dont les conséquences rendent impraticable, telle quelle, la DCSS.
- Le premier impératif, est le partage de la détection, des canaux de la bande de spectre, entre les USs coopérants, de sorte que chacun d'eux soit responsable d'une (ou de quelques) portion(s) de la bande. Le deuxième impératif est l'envoi de rapports au CF (sur les décisions locales concernant l'état des portions de la bande) à l'aide de messages qui ne sont plus de simples bits (0 ou 1), mais des messages plus nuancés qui identifient les portions et leurs états.
- Le premier impératif, nous éloigne de la DCSS puisque ce n'est plus un seul US qui est sélectionné pour rendre compte de l'état de toute la bande, mais tous les USs coopérants (chacun en ce qui concerne la portion dont il a charge) sont tenus d'envoyer leurs rapports au CF. Les tentatives d'envoi de ces rapports vont inévitablement engendrer des collisions, ce qui dégrade les performances et augmente le coût.
- Le deuxième impératif, vient amplifier le phénomène des collisions des messages envoyés du fait qu'ils sont, relativement, plus longs.

La question qui se pose, alors, est de savoir s'il n'y aurait pas une autre voie qui rendrait possible la DCSS dans le contexte des bandes de spectre exploitées selon la TAR OFDM. La réponse, que nous essayerons de justifier dans la suite, est que notre schéma de détection proposé dans le cadre du réseau I-CRICNet est adaptable à la DCSS sans remise en cause des fondements architecturaux et protocolaires de ce réseau.

### 3.3.3.1 Détection de spectre coopérative sélective supérieure adaptée au réseau I-CRICNet

Pour introduire, de manière souple, la DCSS dans I-CRICNet, nous gardons le schéma de détection original auquel nous ajoutons la coopération, comme option. Dans ce schéma étendu, c'est à la SBC que revient la décision de recourir à la coopération (ou non), à chaque fois qu'une OSR est signalée.

Concrètement, le schéma de détection étendu à la détection coopérative comprend les étapes principales suivantes :

1. Lorsqu'une OSR se produit, l'UP qui en a la charge signale cet événement par la diffusion d'une SCC associée. Cette séquence annonce aussi l'envoi synchronisé d'une séquence de symboles d'entraînement qui identifiera l'OSR.
2. Cette même SCC est détectée aussi bien par la SBC que par tous (ou une partie) des USs qui lui sont rattachés. Ils se mettent ensuite dans l'attente de la réception de la séquence de symboles d'entraînement qui identifiera l'OSR.
3. L'UP à l'origine de l'annonce de l'évènement envoie ensuite la séquence d'entraînement attendue, après un délai déterminé.
4. Cette séquence d'entraînement est reçue aussi bien par la SBC que par les USs (qui lui sont rattachés) au fait de l'évènement en cours.
5. La SBC tente d'identifier l'OSR à travers le schéma présenté dans la section.3.2.1.2. Si le résultat est satisfaisant, alors la SBC diffusera ce résultat à tous les USs qui lui sont rattachés pour les informer de la nouvelle OSR. La prise en charge de l'évènement s'arrête là.
6. Par contre, si le résultat du captage n'est pas satisfaisant, alors, la SBC demandera la coopération de ces USs, en envoyant une SCC en ce sens.
7. Les USs (au fait de l'évènement) qui détectent cette SCC de demande de coopération s'y engagent immédiatement. Ils tenteront d'identifier l'OSR, de manière indépendante, par le même schéma utilisé par la SBC. Conformément à la DCSS, un seul (parmi ceux qui réussissent) devra être autorisé à envoyer le rapport sur sa décision locale au CF (SBC) ; c'est l'US supérieur. La sélection de l'US supérieur peut se faire selon une approche similaire à la BSR.
8. La SBC intégrera le premier rapport reçu correctement à sa décision finale (règle OU).
9. La SBC diffusera sa décision finale aux USs qui lui sont rattachés pour leur notifier la nouvelle OSR.

En fait, la description précédente donne une vue synthétique du schéma de détection étendu, qui expose le principe général et le situe par rapport au schéma original. Cependant, une description plus détaillée est nécessaire si on prend en considération le phénomène de migration des SBCs discuté au chapitre.2. Rappelons, que ce phénomène engendre cinq situations (modes) de fonctionnement qui mettent à l'épreuve la généralité du schéma de détection. Les situations (modes) de fonctionnements en questions, que nous décrirons dans ce qui suit, sont :

1. SBC en mode-réunies&groupés, avec respectivement, apparition et extinction d'une OSR.
2. SBC en mode-séparées&groupés, avec, respectivement, apparition et extinction d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en réception.
3. SBC en mode-séparées&groupés avec, respectivement, apparition et extinction d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en émission.
4. SBC en mode-séparées&divisées, avec, respectivement, apparition et extinction d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en réception.
5. SBC en mode-séparées&divisées avec, respectivement, apparition et extinction d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en émission.

Dans la suite, nous allons décrire l'adaptation du schéma générique original à la coopération dans les cinq modes de fonctionnement cités ci-dessus. Globalement, ce schéma générique est structuré en trois phases. Dans la première phase, l'OSR est annoncée à la SBC (dans un premier temps) qui en averti les USs, leur demandant de suspendre, momentanément, les communications en cours pour se consacrer à la prise en charge de l'OSR. Dans un deuxième temps, la séquence *further\_information* est reçue. Les deux autres phases du processus correspondent, respectivement, aux interactions qui résultent de la décision de la SBC de recourir à la coopération ou de ne pas le faire ; la coopération étant, comme déjà rappelé, optionnelle.

Pour la clarté de l'exposé, nous faisons usage de diagrammes de séquence pour la description des interactions, entre les différents acteurs intervenants, et de schémas synoptiques qui en montrent l'ordre, aussi bien dans la phase avec coopération que dans celle sans coopération. Pour chacun des modes de fonctionnement nous allons donc commenter les trois phases du processus correspondant (reprises dans le diagramme de séquence) et les relier aux étapes du schéma synoptique qui l'accompagnent.

### 3.3.3.1.1 SBC en mode-réunies&groupés, avec apparition d'une OSR

Dans ce mode de fonctionnement, tout se passe dans une même bande (celle de *cellul\_1*), et toutes les antennes (de la SBC et des USs) qui sont en mode  $R_x$  sont susceptibles de capter les signaux et données qui sont transmis dans cette bande (de la part des UPs, de la SBC, ou des autres USs). La SBC, ainsi que les USs qui lui sont rattachés, utilisent une antenne pour l'émission et une autre pour la réception. Bien sûr, dans chaque équipement les deux antennes (systèmes) communiquent entre elles et coopèrent. Ce qui se déroule (dans les trois phases) lorsqu'une OSR se produit peut être résumé comme suit (Figure.56) :

*Phase 1* : Cette phase correspond aux étapes 1 à 3 des figures Figure.57a et Figure.57b. Le UP qui prévoit l'occurrence d'une OSR diffuse *RSO\_start* (une SCC) qui est reçue par la SBC (à travers l'antenne en réception) et éventuellement un certain nombre de USs. La SBC, diffuse (à travers l'antenne en émission) *CCS\_hold* (une autre SCC) destinée aux USs, qui y réagissent en se mettant en silence. Le même UP fait suivre *RSO\_start* de *further\_information1*, destinée aussi bien à la SBC qu'aux USs qui lui sont rattachés.

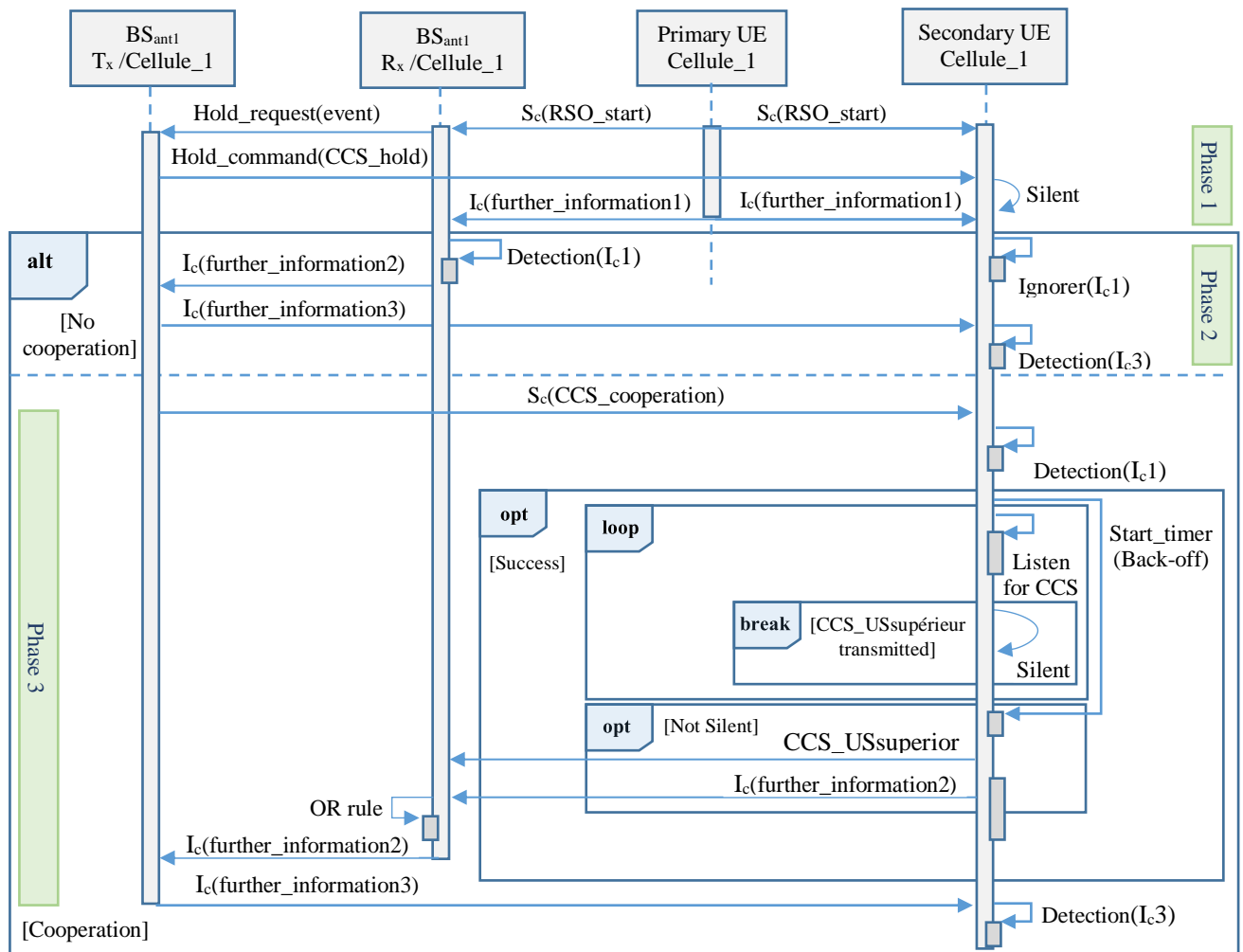


Figure 56 Diagramme de séquence : détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en mode réunies&groupées

*Phase 2* : Cette phase est entamée lorsque la SBC décide de ne pas recourir à la coopération, et correspond à l'étape 4 de Figure.57a. L'information *further\_information1* y est détectée par la SBC qui la rediffuse à ses USs, pour les informer du changement de l'état des OSRs disponibles.

*Phase 3* : Cette phase est entamée lorsque la SBC décide de recourir à la coopération, et correspond aux étapes 4 à 6 de Figure57b. Elle est déclenchée par la diffusion de *CCS\_cooperation*, par la SBC), qui invitent les USs à lui faire part de la version de *further\_information1* qu'ils ont détecté localement. Les USs candidats se mettent, chacun, à l'écoute du canal de communication pendant une durée

déterminée localement. Le US dont la durée d'écoute s'écoule en premier, diffuse *CCS\_USsuperior* (une SCC) pour déclarer son intention d'envoyer sa version *further\_information2* à la SBC ; chose

qu'il fait immédiatement après (cet US est appelé US supérieur). Les autres USs candidats, se retirent de la compétition dès qu'ils détectent *CCS\_USsuperior* du US supérieur. La SBC, en détectant *further\_information2* applique la règle OU (à *further\_information1* et *further\_information2*) et rediffuse le résultat *further\_information3* à ses USs pour les informer du changement de l'état des OSRs disponibles.

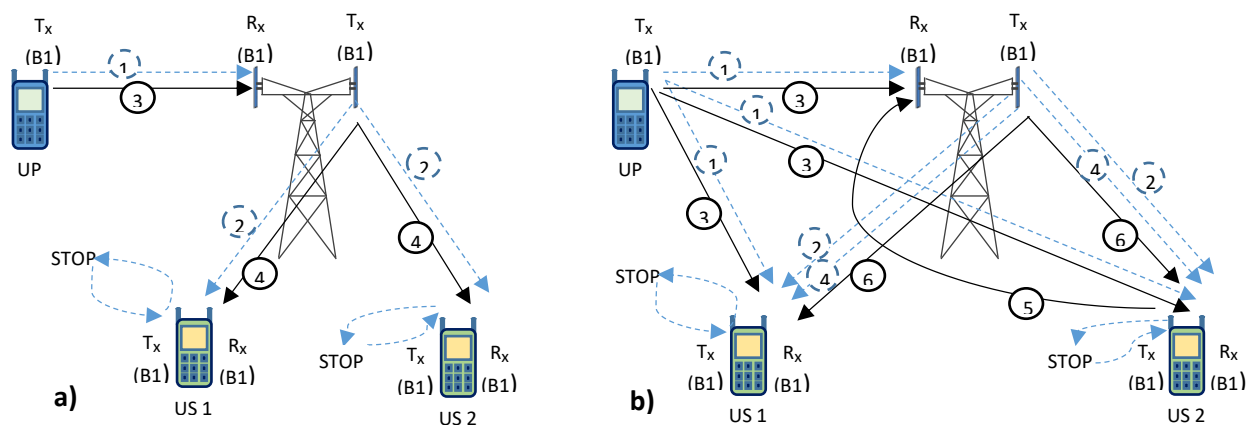


Figure 57 Etapes de la détection dans I-CRICNet, antennes en mode réunies&groupées  
a) sans coopération ; b) coopération sélective supérieure

### 3.3.3.1.2 SBC en mode-séparées&groupés, avec apparition d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en réception

La SBC, dans ce mode fonctionnement, est à cheval sur les deux bandes B1 et B2 (celles de la cellule 1 et 2). On se place dans le cas où l'OSR se produit dans la bande B1. Les deux antennes de la SBC ( $SB_{ant1}$ ,  $SB_{ant2}$ ) sont réglées sur le mode  $R_x$ , dans la bande B1, et le mode  $T_x$ , dans la bande B2, respectivement (mode séparées). L'ensemble des USs forment un seul groupe (mode groupés), pour leurs communications opportunistes, dont chaque membre émet vers  $SB_{ant1}$  et reçoit de  $SB_{ant2}$ . Dans cette configuration, chaque USs dédie une de ses antennes à la communication et l'autre, en mode  $R_x$ , à la détection des SCCs de contrôle, sur la bande B2, qui sont transmises par à travers l'antenne  $SB_{ant2}$  de la SBC. Les trois phases de prise en charge d'une OSR dans ce mode de fonctionnement se présentent comme suit (Figure.58) :

*Phase 1* : Elle correspond aux étapes 1 à 4 de Figure.59a et Figure.59b. L'UP qui prévoit une OSR, envoie d'abord la SCC "*RSO\_start*" dans l'espoir d'être captée par  $SB_{ant1}$ , dans la bande B1. Une fois

"*RSO\_start*" détectée,  $SB_{ant1}$  demande (*Hold\_request*) à  $SB_{ant2}$  d'avertir les USs de cet évènement, chose que celle-ci fait en diffusant *Hold\_command*. En détectant cette commande, les USs basculent

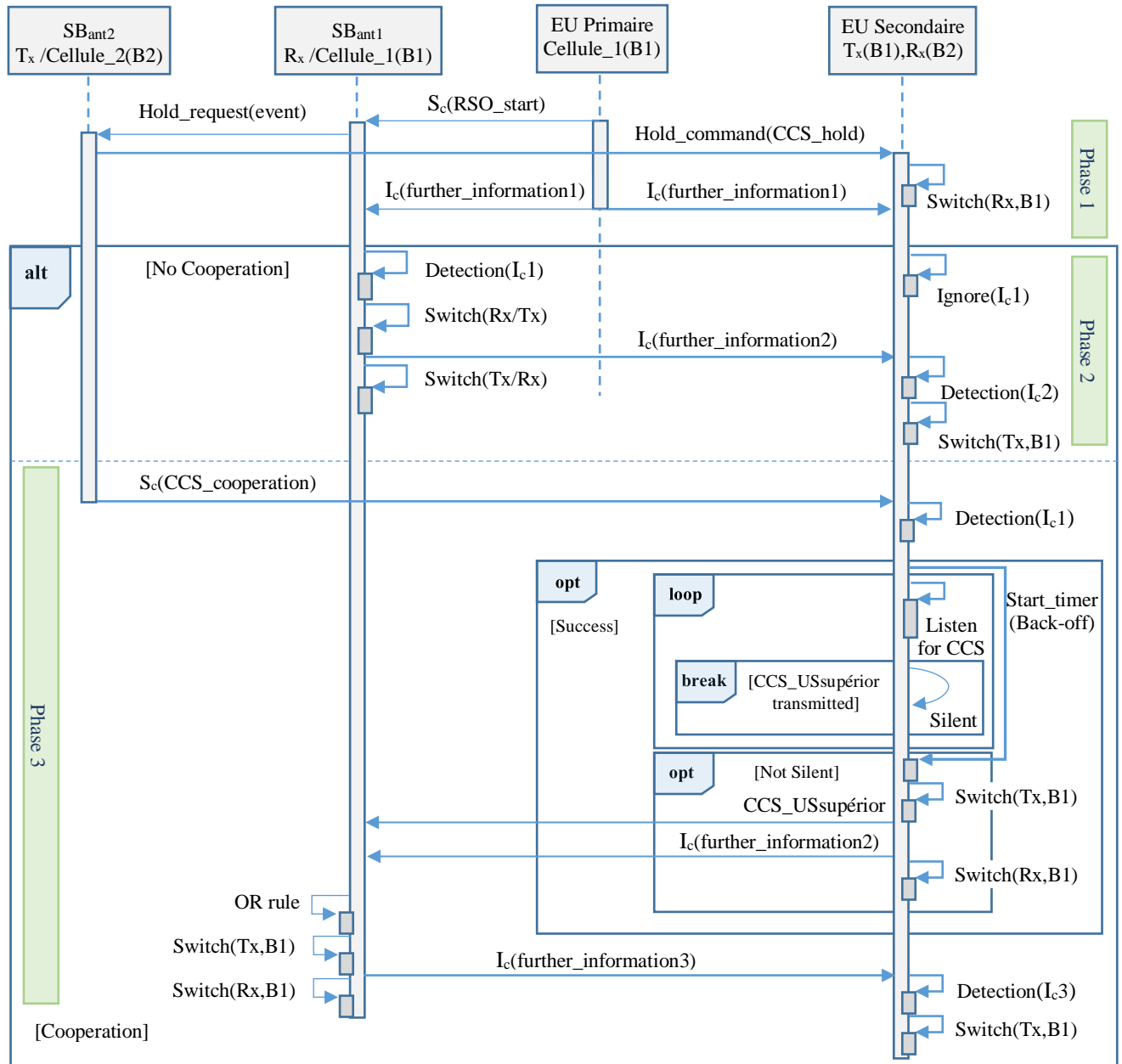


Figure 58 Diagramme de séquence : détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, OSR sur antennes en réception, mode séparée&groupées

en mode  $R_x$  sur B1 pour attendre l'arrivée de l'information *further\_information1*. Cette phase se termine lorsque *further\_information1* reçue par  $SB_{ant1}$  et, éventuellement, par certains USs.

*Phase 2* : Cette phase, correspond aux étapes 5 à 7 de Figure.59a et se déroule dans le cas où la coopération ne s'avère pas nécessaire. La SBC bascule en mode  $T_x$  pour diffuser aux USs, à travers  $SB_{ant1}$  dans B1, la version de *further\_information1* détectée (*further\_information2*) pour permettre ceux-ci de se synchroniser sur le nouvel état des OSRs disponibles. Les USs, ayant déjà leurs antennes

de communication réglées en mode  $R_x$  sur B1, vont donc recevoir cette information, après quoi ils rebasculent en mode  $T_x$  tandis que  $SB_{ant1}$  rebascule en mode  $R_x$  pour reprendre les communications interrompues suite à l'apparition de l'OSR. La phase 2, s'arrête là.

*Phase 3* : Lorsque la coopération est souhaitée, la SBC le fait savoir aux USs, par la diffusion de la SCC "*CCS\_coopération*", et ils entrent tous dans cette phase, qui correspond aux étapes 5 à 10 de Figure.59b. Les USs qui ont déjà détecté *further\_information1* vont essayer d'envoyer leurs versions à la SBC, mais un seul est autorisé à le faire après qu'il a réussi à échapper aux collisions provoquées par les autres USs candidats. Pour se départager chaque US initialise, indépendamment, une horloge pour fixer la durée locale pendant laquelle il se mettra à l'écoute du canal de communication. Le US dont l'horloge locale revient à zéro en premier, bascule son antenne de communication en mode  $T_x$ , diffuse *CCS\_USsuperior* (une SCC) pour déclarer son intention d'envoyer sa version *further\_information2* à la SBC ; chose qu'il fait immédiatement après (cet US est appelé US supérieur). Il rebascule son antenne en mode  $R_x$ , pour recevoir le résultat final de la SBC. Les autres

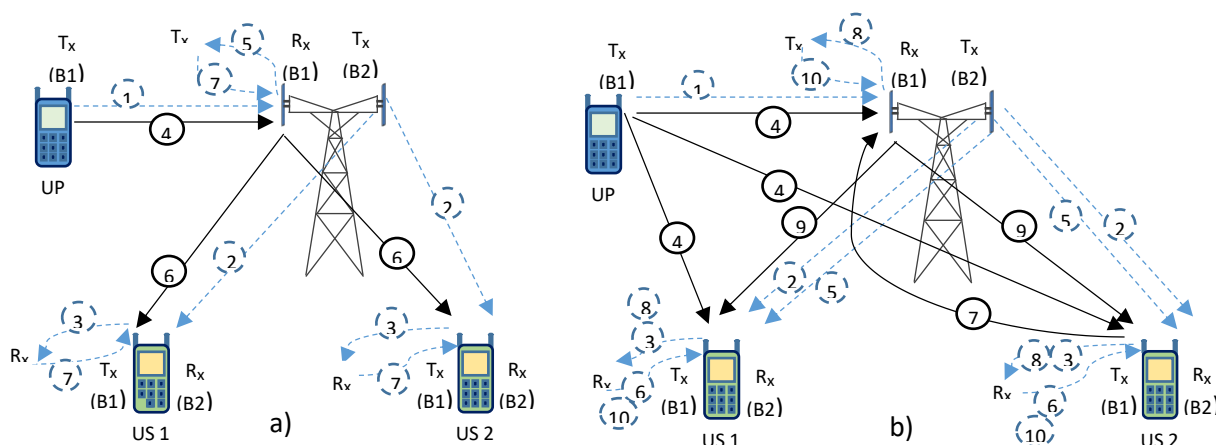


Figure 59 Détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en réception, mode séparée&groupées a) sans coopération ; b) avec coopération

USs candidats, se retirent de la compétition dès qu'ils détectent *CCS\_USsuperior* du US supérieur. La SBC, en détectant *further\_information2* applique la règle OU (à *further\_information1* et *further\_information2*), rebascule  $SB_{ant1}$  en mode  $T_x$ , rediffuse le résultat *further\_information3* à ses USs (pour les informer du changement de l'état des OSRs disponibles), et rebascule  $SB_{ant1}$  en mode  $R_x$ . Le US supérieur rebascule en mode  $T_x$ , et tout le monde reprend ses communications suspendues.

### 3.3.3.1.3 SBC en mode-séparées&groupés avec apparition d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en émission

La situation dans ce mode fonctionnement est la même que celle du mode précédent, à savoir que la SBC est à cheval sur les deux bandes B1 et B2 (celles de la cellule 1 et 2), que les deux antennes de la SBC ( $SB_{ant1}$ ,  $SB_{ant2}$ ) sont réglées sur le mode  $R_x$ , dans la bande B1, et le mode  $T_x$ , dans la bande

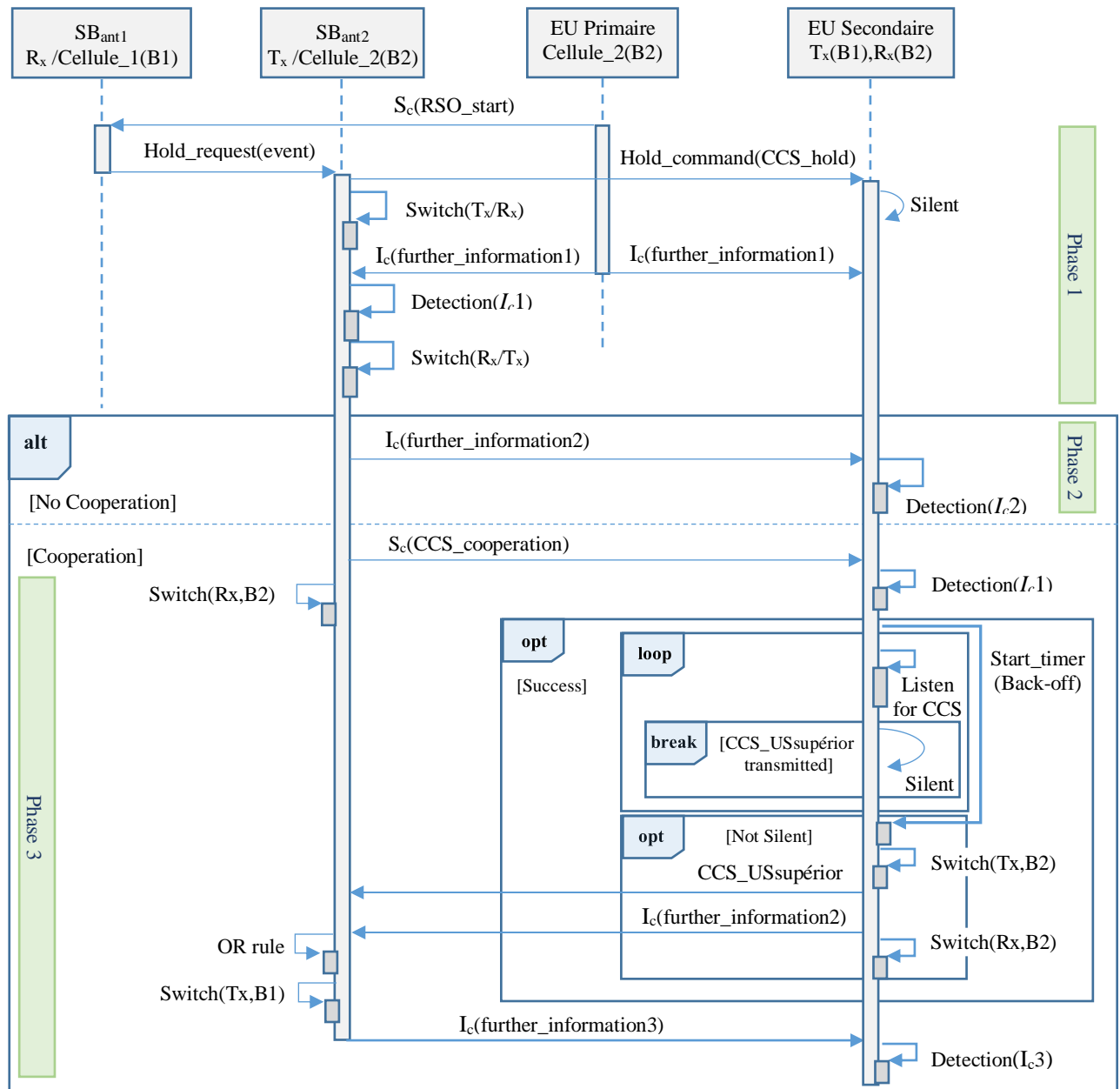


Figure 60 Diagramme de séquence : détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en émission, mode séparée&groupées

B2, respectivement (mode séparées). De même, l'ensemble des USs forment un seul groupe (mode divisés), pour leurs communications opportunistes, dont chaque membre émet vers  $SB_{ant1}$  et reçoit de  $SB_{ant2}$ . Ici aussi, chaque USs dédie une de ses antennes à la communication et l'autre, en mode  $R_x$ , à la détection des SCCs de contrôle, sur la bande B2, qui sont transmises par à travers l'antenne  $SB_{ant2}$  de la SBC. La différence, est qu'on se place dans le cas où l'OSR se produit dans la bande B2. Les

trois phases de prise en charge d'une OSR dans ce mode de fonctionnement se présentent, alors, comme suit (Figure.60) :

*Phase 1* : Elle correspond aux étapes 1 à 5 de Figure.61a et Figure.61b. L'UP qui prévoit une OSR, envoie d'abord la SCC "*RSO\_start*" dans l'espoir d'être captée par  $SB_{ant1}$ , dans la bande B1. Une fois "*RSO\_start*" détectée,  $SB_{ant1}$  demande (*Hold\_request*) à  $SB_{ant2}$  d'avertir les USs de cet événement, chose que celle-ci fait en diffusant *Hold\_command*, sur B2. En détectant cette commande, les USs, en mode  $R_x$  sur B2 vont attendre l'arrivée de l'information *further\_information1*, sur B2 aussi, tandis que l'antenne  $SB_{ant2}$  va basculer en mode  $R_x$  pour la même raison. Cette phase se termine lorsque *further\_information1* est reçue par  $SB_{ant2}$  (qui rebascule en mode  $T_x$ ) et, éventuellement, certains USs.

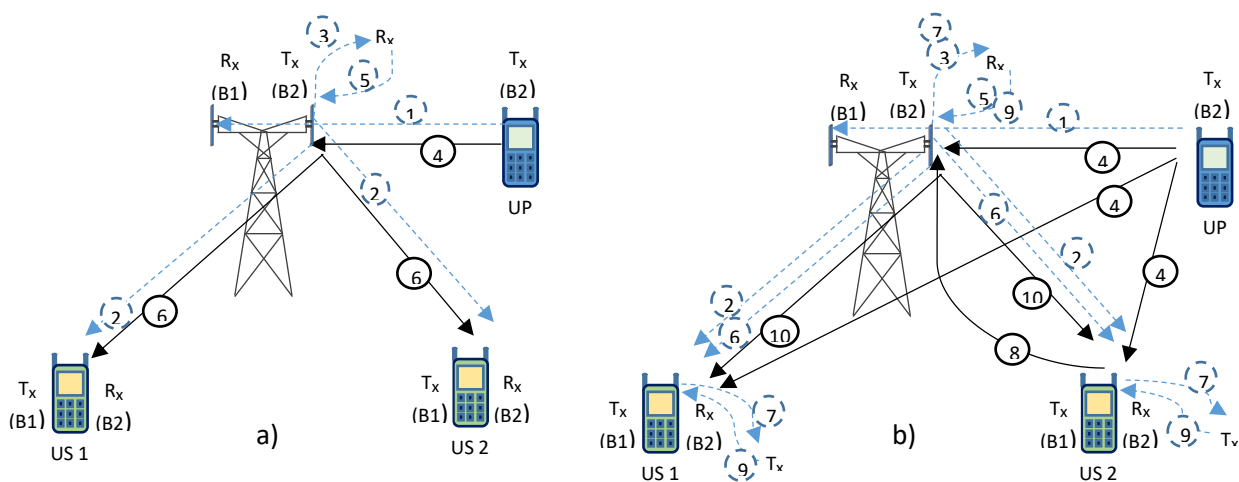


Figure 61 Détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en émission, mode séparée&groupées a) sans coopération ; b) avec coopération

*Phase 2* : Cette phase, correspond à l'étape 6 de Figure.61a ; elle se déroule dans le cas où la coopération n'a pas lieu. La SBC diffuse aux USs la version de *further\_information1* détectée (*further\_information2*), à travers  $SB_{ant2}$  dans B2, pour permettre ceux-ci de se synchroniser sur le nouvel état des OSRs disponibles. Les USs, ayant déjà leurs antennes de communication réglées en mode  $R_x$  sur B2, vont donc recevoir cette information, après quoi tout le monde reprend les communications interrompues suite à l'apparition de l'OSR. La phase 2, s'arrête là.

*Phase 3* : Lorsque la coopération a lieu, la SBC le fait savoir aux USs, par la diffusion de la SCC "*CCS\_coopération*" (toujours à travers  $SB_{ant2}$ ), et ils entrent tous dans cette phase qui correspond aux étapes 6 à 10 de Figure.61b. Les USs qui ont déjà détecté *further\_information1* vont essayer d'envoyer leurs versions à la SBC, mais un seul est autorisé à le faire après qu'il a réussi à échapper aux collisions provoquées par les autres USs candidats. Pour se départager chaque US initialise, indépendamment, une horloge pour fixer la durée locale pendant laquelle il se mettra à l'écoute du canal de communication. Le US dont l'horloge locale revient à zéro en premier, bascule son antenne de communication en mode  $T_x$ , diffuse *CCS\_USsuperior* (une SCC) pour déclarer son intention

d'envoyer sa version *further\_information2* à la SBC ; chose qu'il fait immédiatement après (cet US est appelé US supérieur). Il rebascule son antenne en mode  $R_x$ , pour recevoir le résultat final de la SBC. Les autres USs candidats, se retirent de la compétition dès qu'ils détectent *CCS\_USsuperior* du US supérieur. La SBC, en détectant *further\_information2* applique la règle OU (à *further\_information1* et *further\_information2*), rebascule  $SB_{ant1}$  en mode  $T_x$ , rediffuse le résultat *further\_information3* à ses USs (pour les informer du changement de l'état des OSRs disponibles), et tout le monde reprend ces communications suspendues.

### 3.3.3.1.4 SBC en mode-séparées&divisées, avec apparition d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en réception

La SBC, dans ce mode fonctionnement, est à cheval sur les deux bandes B1 et B2 (celles de la cellule 1 et 2). On se place dans le cas où l'OSR se produit dans la bande B1. Les deux antennes de la SBC ( $SB_{ant1}$ ,  $SB_{ant2}$ ) sont réglées sur le mode  $R_x$ , dans la bande B1, et le mode  $T_x$ , dans la bande B2, respectivement (mode séparées). L'ensemble des USs est, maintenant, divisé en deux groupes (pour leurs communications opportunistes) rattachés chacun à l'une des deux antennes  $SB_{ant1}$  ou  $SB_{ant2}$ , (mode groupés). Dans cette configuration, chaque USs dédie une de ses antennes à l'émission (mode  $T_x$ ) vers  $SB_{ant1}$ , et l'autre à la réception de  $SB_{ant2}$  (mode  $R_x$ ). L'antenne en mode  $R_x$  de chaque US sert aussi à la détection des SCCs de contrôle qui sont transmises à travers l'antenne  $SB_{ant2}$  de la SBC, dans la bande B2. Les trois phases de prise en charge d'une OSR dans ce mode de fonctionnement se fait de manière similaire à celle du mode divisés&groupés (correspondant) à ceci près que seul le groupe rattaché à  $SB_{ant1}$  intervient dans la prise en charge des OSRs qui apparaissent dans la bande de communication B1, l'autre groupe n'est pas concerné, Figure.63.

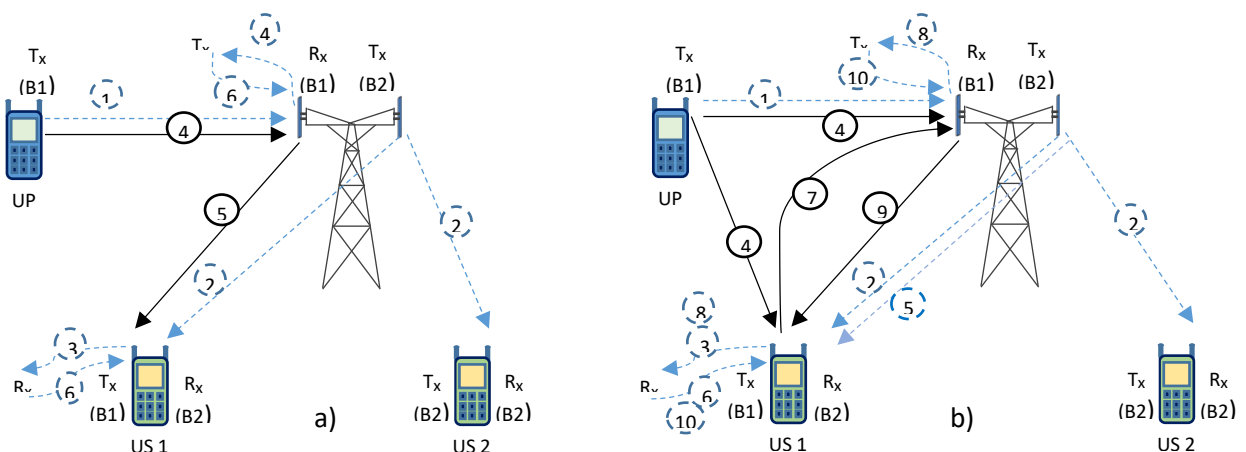


Figure 62 Détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en réception, mode séparées&divisées a) sans coopération ; b) avec coopération

*Phase 1* : Elle correspond aux étapes 1 à 4 de Figure62.a et Figure.62b.

*Phase 2* : Cette phase, correspond aux étapes 5 à 6 de Figure.62a .et se déroule dans le cas où la coopération ne s'avère pas nécessaire.

*Phase 3* : Lorsque la coopération a lieu, cette phase qui correspond aux étapes 5 à 10 de Figure.62b.

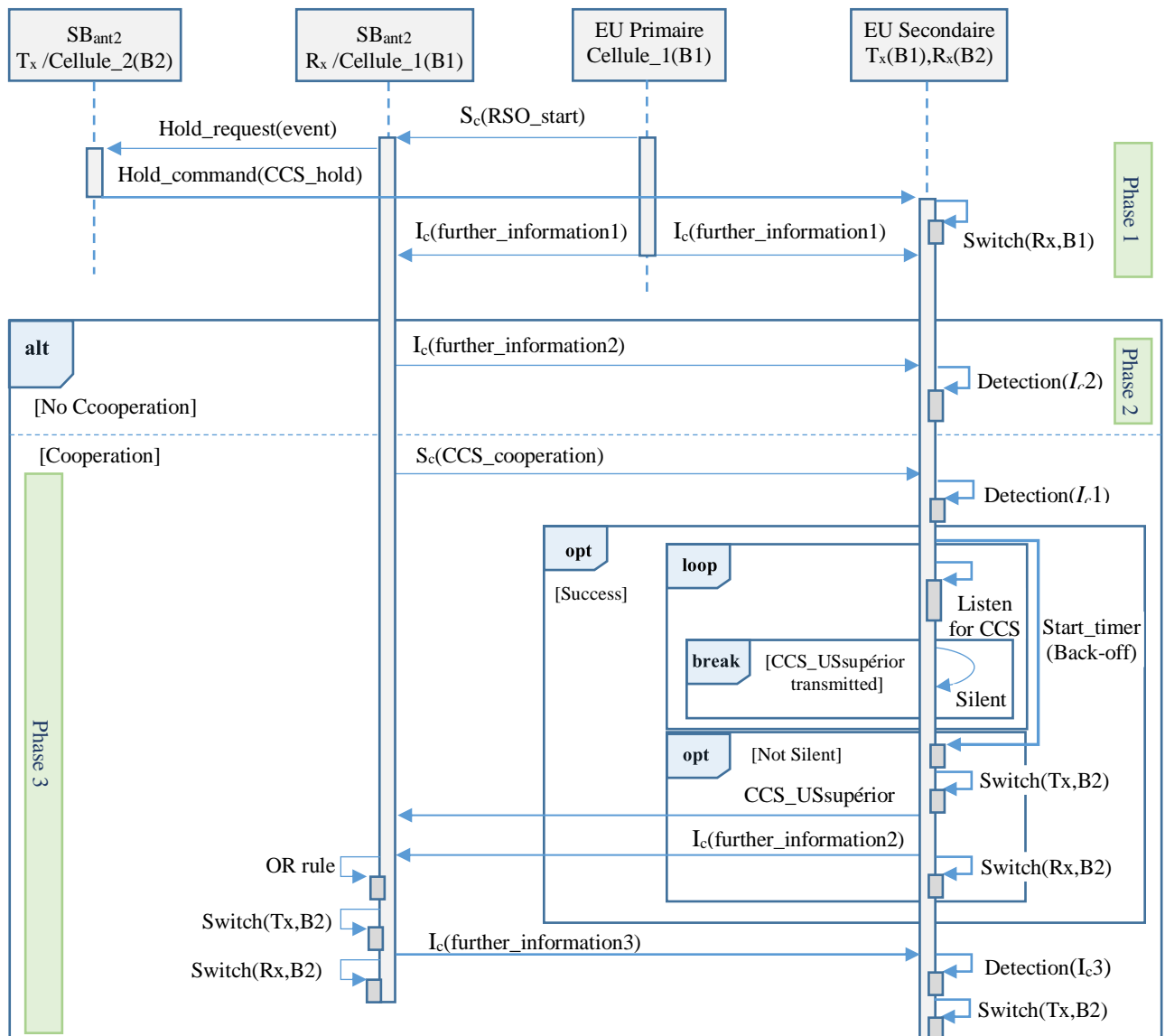


Figure 63 Diagramme de séquence : détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en réception, mode séparées&divisées

### 3.3.3.1.5 SBC en mode-séparées&divisées, avec apparition d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en émission

La SBC, dans ce mode fonctionnement, est à cheval sur les deux bandes B1 et B2 (celles de la cellule 1 et 2). On se place dans le cas où l'OSR se produit dans la bande B2. Les deux antennes de la SBC ( $SB_{ant1}$ ,  $SB_{ant2}$ ) sont réglées sur le mode  $R_x$ , dans la bande B1, et le mode  $T_x$ , dans la bande B2,

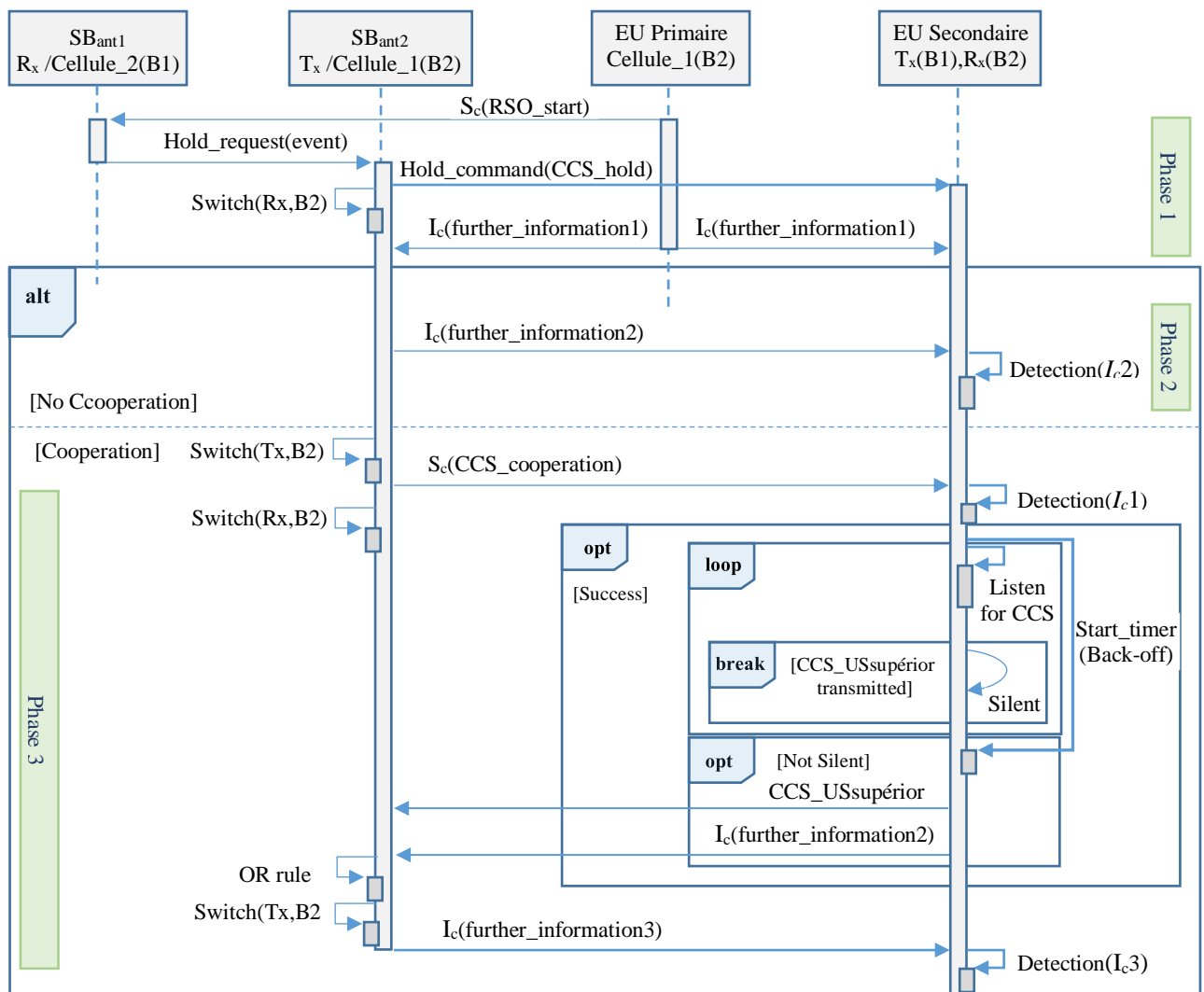


Figure 65 Diagramme de séquence : détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en émission, mode séparée&divisées

respectivement (mode séparées). L'ensemble des USs est, maintenant, divisé en deux groupes (pour leurs communications opportunistes) rattachés chacun à l'une des deux antennes SB<sub>ant1</sub> ou SB<sub>ant2</sub>, (mode groupés). Dans cette configuration, chaque USs dédie une de ses antennes à l'émission (mode T<sub>x</sub>) vers SB<sub>ant1</sub>, et l'autre à la réception de SB<sub>ant2</sub> (mode R<sub>x</sub>). L'antenne en mode R<sub>x</sub> de chaque US sert aussi à la détection des SCCs de contrôle qui sont transmises à travers l'antenne SB<sub>ant2</sub> de la SBC, dans la bande B2. Les trois phases de prise en charge d'une OSR dans ce mode de fonctionnement se fait de manière similaire à celle du mode divisés&groupés (correspondant) à ceci près que seul le groupe rattaché à SB<sub>ant2</sub> intervient seulement dans la prise en charge des OSRs qui apparaissent dans la bande de communication B2, l'autre n'est pas concerné, Figure.65.

*Phase 1* : Elle correspond aux étapes 1 à 4 de Figure.64a et Figure.64b.

*Phase 2* : Cette phase, correspond aux étapes 5 à 6 de Figure.64a et se déroule dans le cas où la coopération ne s'avère pas nécessaire.

*Phase 3* : Lorsque la coopération a lieu, cette phase qui correspond aux étapes 5 à 10 de Figure.64b.

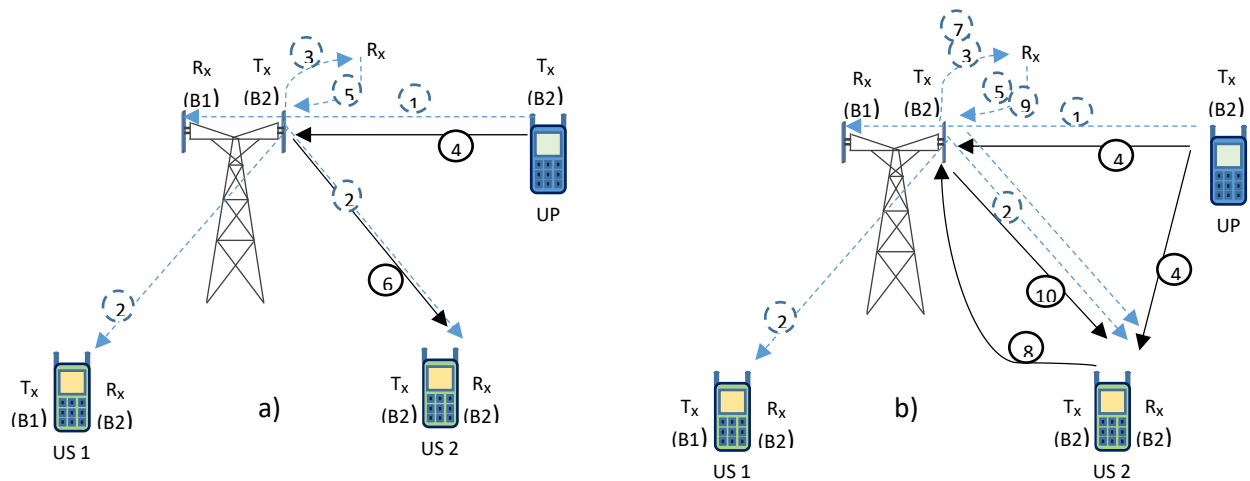


Figure 64 Détection coopérative sélective supérieure dans I-CRICNet, antennes en émission, mode séparée&divisées a) sans coopération ; b) avec coopération

### 3.3.3.2 Rôles des différents acteurs dans la notification coopérative des OSRs

Les schémas de protocole coopératifs qui ont fait l'objet de la section précédente ont fait apparaître la diversité des interactions impliquées par ces schémas. Dans cette section, nous passons à la description des comportements (intégrant la coopération) de chacun des différents acteurs intervenant dans ces interactions. Cet aspect, nous semble-t-il, doit être considéré pour juger de l'aptitude à l'automatisation, et de la complexité de l'implémentation des schémas de notification présentés. La description faite, est plutôt orientée vers la mise en œuvre pratique, et utilise les diagrammes d'états pour donner une vue synthétique du rôle (dans la coopération) de chaque acteur, en regroupant dans une même représentation ses multiples interventions, dispersées dans les différents schémas de protocole.

Les acteurs, comme déjà signalé, appartiennent à trois groupes, à savoir : les PUs, les SBCs, et les SUs ; c'est selon cet ordre que leurs rôles font être présentés. Cependant, nous limiterons nos commentaires aux rôles des acteurs dans la coopération ; leurs rôles en dehors de la coopération étant les mêmes que ceux déjà décrits dans le chapitre.2. Nous indiquerons comment, de manière incrémentale, des états-transitions nouveaux ont été ajoutés et articulés aux anciens.

### 3.3.3.2.1 Diagramme d'état des UPs (Figure.66)

Globalement, le rôle des UPs ne change pas, et reste identique à celui décrit au chapitre.II. Il consiste, fondamentalement, à annoncer une OSR par le biais de la SCC "*OSR\_strat*", attendre l'expiration

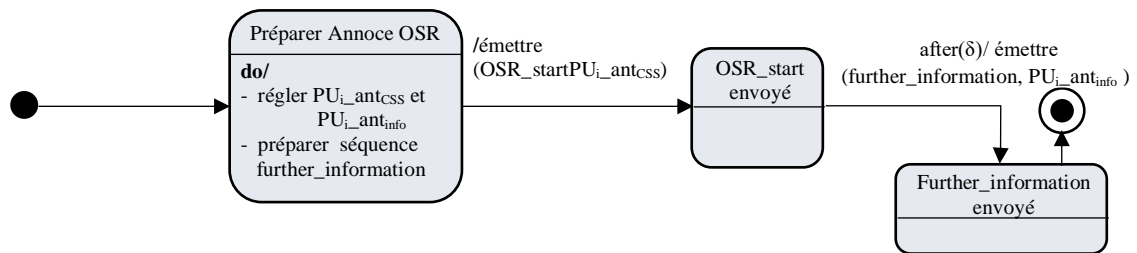


Figure 66 Diagramme d'état d'un UP schéma de coopération sélective supérieure

d'un délai pour permettre aux autres acteurs de préparer, et diffuser l'information (*further\_information*) leur permettant de localiser l'OSR.

### 3.3.3.2.2 Diagramme d'état des SBCs

Puisque chaque SBC est dotée de deux systèmes d'antennes (*SBant<sub>1</sub>*, *SBant<sub>2</sub>*), et que chacun d'eux peut se mettre en mode réception (*R<sub>x</sub>*) ou en en mode transmission (*T<sub>x</sub>*), il y a lieu de distinguer, donc, deux rôles pour chaque antenne. Les deux rôles sont complémentaires (comme il sera expliqué ci-après), en ce sens que lorsqu'une des deux antennes est en émission l'autre devra être en réception.

#### a) Système d'antenne en réception (Figure.67)

Le rôle de l'antenne en réception (dans la prise en charge d'une OSR signalée) lorsque la coopération n'est pas souhaitée est déjà décrit dans chapitre.II. Pour la prise en charge de la coopération (traitement coopératif), trois état-transition nouveaux sont introduits, dont l'activation se fait à cette occasion. Concrètement, lorsque la SBC décide la coopération, après réception de *further\_information*, son antenne en mode *R<sub>x</sub>* (*SBant<sub>i</sub>*) soumet une requête (*Cooperation\_request*) à l'antenne en mode *T<sub>x</sub>* (*SBant<sub>i+1[3]</sub>*) pour que celle-ci invitent les USs concernés à coopérer. *SBant<sub>i</sub>*, s'attend alors à recevoir une version de *further\_information* détectée localement par l'un des USs coopérants. Le premier des USs qui réussisse à faire parvenir cette information à la SBC est appelé *US<sub>superior</sub>*, qui envoie d'abord la SCC "*CCS<sub>superior</sub>*" et la fait suivre par sa version de *further\_information*, détectée localement. A la réception de ces deux signaux, *SBant<sub>i</sub>* applique l'opérateur logique OU aux deux versions de *further\_information* (sa propre version et celle reçue de *US<sub>superior</sub>*), dont le résultat constitue la décision finale sur l'état de l'OSR signalée. A ce stade, s'achève la différence avec le diagramme sans coopération, puisque pour diffuser la décision globale aux USs

concernés,  $BSant_i$  adopte le comportement décrit par sous-diagramme "traitement non coopératif", qui est commun aux deux options (avec et sans coopération).

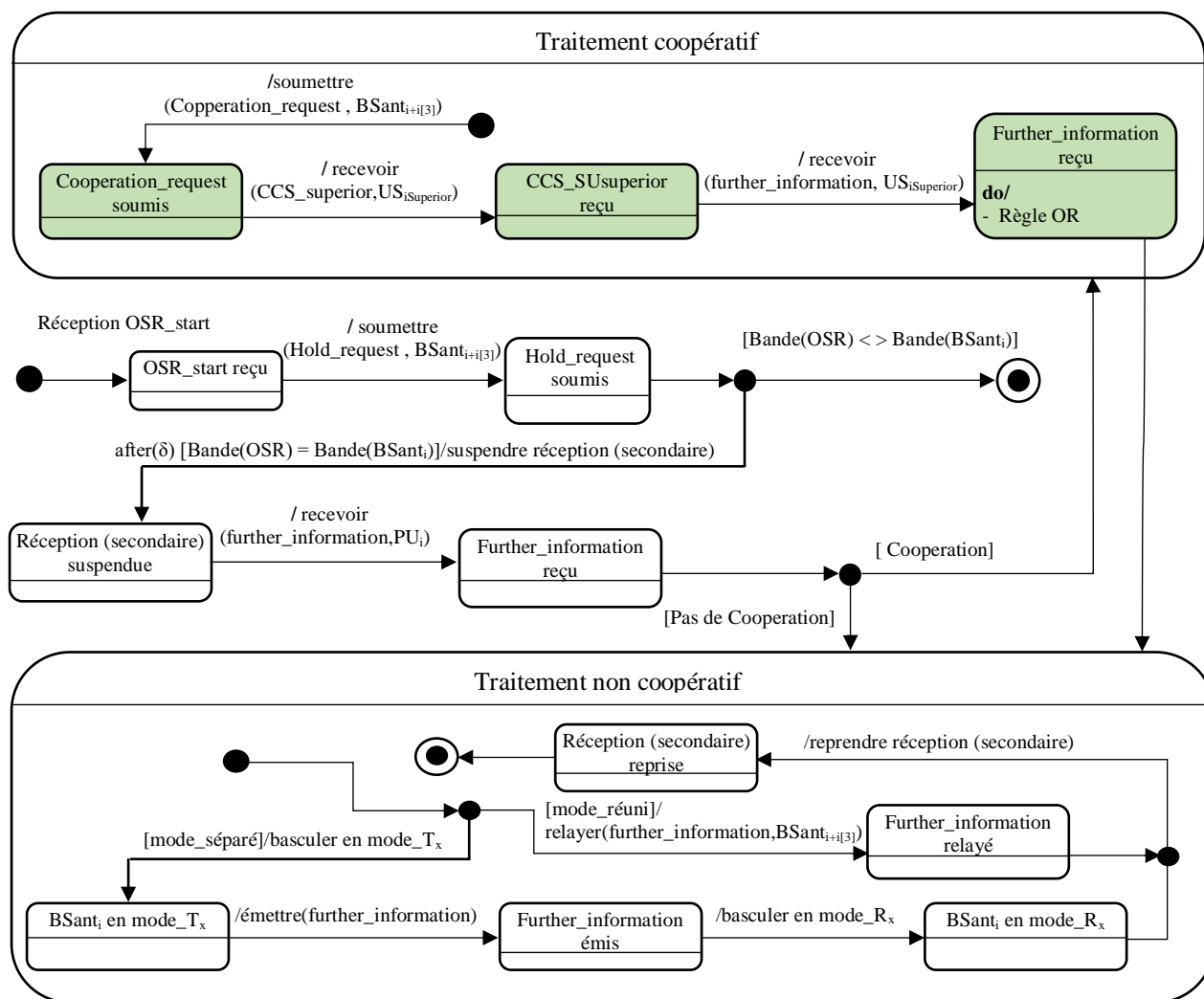


Figure 67 Diagramme d'état SBC schéma de coopération sélective supérieure, antenne en mode émission

## b) Système d'antenne en réception (Figure.68)

Le sous-diagramme qui décrit les état-transition activés pour la prise en charge d'une OSR sans coopération, est le même que le diagramme présenté dans le chapitre II. Pour la coopération, sept état-transition ont été ajoutés (Traitement coopératif+cooperation\_request diffusée). L'antenne en mode  $T_x$  est sollicitée, en début de coopération, pour diffuser la SCC "Cooperation\_request" demandant aux USs de coopérer, en envoyant leurs versions locales de *further\_information* ; son rôle s'arrête là si la bande d'apparition de l'OSR n'est pas celle de l'antenne. Si, au contraire, l'OSR se produit dans la bande de communication de l'antenne, alors, c'est celle-ci qui va se charger de la réception de *further\_information*, et qui va décider de lancer la coopération (ou non) sur la base du résultat de cette réception. En cas de coopération, l'antenne commence par diffuser la SCC "Cooperation\_request", puis bascule en mode  $R_x$  et attend la réponse de l'US supérieur. Ce dernier, se manifeste par l'émission





premier temps, d'initialiser une horloge locale avec un délai inversement proportionnel à la qualité du canal entre l'antenne et la SBC. Dans un deuxième temps, l'antenne devra se mettre à l'écoute du canal de communication tant que le délai de son horloge locale n'a pas expiré. Si avant l'expiration l'antenne détecte une SCC "CSS\_USsuperior" (envoyée par un autre US), elle se met dans l'état de reprise des réceptions normales, suspendues par l'occurrence de l'OSR. Dans le cas où le délai expiré avant qu'aucune "CSS\_USsuperior" ne soit détectée, alors, l'antenne envoie une SCC "CSS\_USsuperior" qu'elle fera suivre par sa copie locale de *further\_information* (*further\_information1*), à la SBC. Les autres USs en détectant ces envoies y reconnaîtrons un US supérieur et s'abstiendront d'interférer avec lui. Les USs concernés vont ensuite se mettre dans l'attente de la réception de la décision finale. En effet, en recevant l'envoi du US supérieur, la SBC procède à la prise de décision finale (opérateur OU), et diffuse cette décision aux USs concernés pour qu'ils soient informés du nouvel état des OSRs qui supporteront les futures communications opportunistes. A la fin, les réceptions normales (opportunistes) reprennent.

#### **b) Système d'antenne en émission ( $SU_{iant_{comm}}$ ) (Figure.70)**

Vu qu'elle est en mode  $T_x$ , cette antenne ne peut pas détecter par elle-même les événements qui se déroulent dans sa bande de communication. C'est l'antenne  $SU_{iant_{surv}}$  (en mode  $R_x$ ) qui lui adresse une requête pour récupérer l'information *further\_information*, que le UP qui signale l'OSR va émettre. En l'absence de coopération, les états-transition se succèdent comme présenté au chapitre II. Pour la coopération, nous avons ajouté sept états-transition pour supporter les nouveautés qu'elle implique ; dont la première est d'essayer de détecter la version *further\_information1* envoyée par le UP (pour cela l'antenne bascule en mode  $R_x$ ), pour la transmettre à la SBC, si cette dernière le demande. La seconde nouveauté, est le comportement de l'antenne lorsqu'elle est sollicitée pour coopérer (détection de la SCC "CCS-cooperation"). Dans cette dernière situation, va tenter d'envoyer une copie de *further\_information1*, qu'elle avait détecté auparavant, à la SBC. Vu que, plusieurs USs vont probablement tenter la même chose, des collisions se produiront et empêcheront les USs d'arriver à leur fin, si aucune mesure préventive n'est prise. Cette mesure exige de l'antenne, dans un premier temps, d'initialiser une horloge locale avec un délai inversement proportionnel à la qualité du canal entre l'antenne et la SBC. Dans un deuxième temps, l'antenne devra se mettre à l'écoute du canal de communication tant que le délai de son horloge locale n'a pas expiré. Si avant l'expiration l'antenne détecte une SCC "CSS\_USsuperior" (envoyée par un autre US), elle se met dans l'état de reprise des réceptions normales, suspendues par l'occurrence de l'OSR. Dans le cas où le délai expiré avant qu'aucune "CSS\_USsuperior" ne soit détectée, alors, l'antenne envoie une SCC "CSS\_USsuperior" qu'elle fera suivre par sa copie locale de *further\_information* (*further\_information1*), à la SBC. Les autres USs en détectant ces envoies y reconnaîtrons un US

supérieur et s'abstiendront d'interférer avec lui. Les USs concernés vont ensuite se mettre dans l'attente de la réception de la décision finale. En effet, en recevant l'envoi du US supérieur, la SBC procède à la prise de décision finale (opérateur OU), et diffuse cette décision aux USs concernés pour qu'ils soient informés du nouvel état des OSRs qui supporteront les futures communications opportunistes. A la fin, les émissions normales (opportunistes) reprennent.

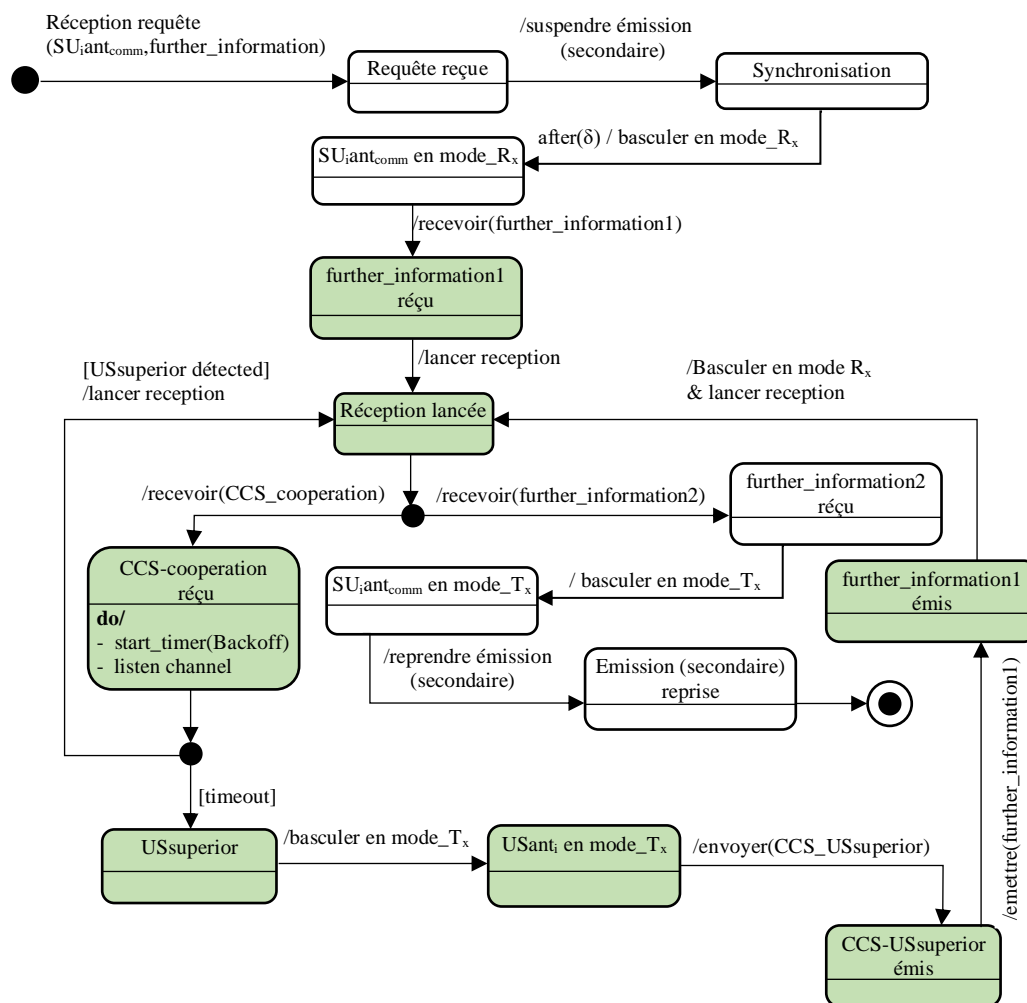


Figure 70 Diagramme d'état US schéma de coopération sélective supérieure, antenne en mode émission

### 3.4 Conclusion

Nous venons de présenter deux autres contributions de notre thèse. La première contribution, est un schéma de détection des OSRs dans le cadre des réseaux primaires qui adopte la technique d'accès réseau OFDM. Ce schéma illustre une des implémentations possibles de la détection des séquences d'entraînement utilisées dans le schéma générique du chapitre 2. La qualité de la détection est améliorée grâce à la prise en compte du contexte. Un résultat important obtenu est la détermination de la nature de la loi de probabilité de la fonction qui est utilisée pour la détection. La deuxième

contribution, est la prise en charge de la coopération (optionnelle) dans le schéma de détection générique présenté au chapitre 2. Nous avons adapté la détection coopérative sélective supérieure au contexte du réseau I-CRICNet. Nous avons aussi montré la généricité de notre schéma, en présentant sa version coopérative dans les différents modes de fonctionnement de I-CRICNet. Enfin, nous avons donné les diagrammes d'activités des différents acteurs de l'architecture de notre réseau lorsque la coopération est prise en charge. Cela nous permet d'avoir une idée sur la complexité engendrée par la coopération et de la faisabilité de notre proposition.

---

# CHAPITRE 4

## ANALYSE ET EVALUATION DES PERFORMANCES

---

### 4.1 Résultats des simulations du schéma de détection de base

Dans cette section, nous présentons les résultats de l'évaluation de performances du schéma de détection détaillé au chapitre.2, obtenus par simulations avec le logiciel MATLAB [78]. Les simulations portent sur un système NC-OFDM qui consiste en des trames de 1024 sous-canaux (sous-porteuses), avec un préfixe cyclique (cyclic prefix CP) d'une longueur égale au quart ( $1/4$ ) de la durée d'un symbole OFDM. Les symboles OFDM de chaque trame contiennent des sous-canaux contigus, arbitrairement disposés, acheminant des séquences d'entraînement pour indiquer les sous-canaux libres (ou actifs). Ce sont des séquences prédéfinies de symboles modulés selon la technique QPSK sur les sous-canaux OFDM libres (ou actifs). Le nombre de sous-canaux libres est fixé à 512, et la probabilité à priori  $P(S_k = 1)$  est fixée à 0.5 pour tous les sous-canaux. Les modèles de canaux de communication utilisés dans nos simulations sont le modèle "*Additive White Gaussian Noise* (AWGN)", le modèle "*Ricean fading*", et le modèle "*Rayleigh fading*". Le nombre de sous-canaux adjacents utilisé pour le calcul de l'APP est fixé à  $J = 32$ . Pour les besoins de détection, l'information d'état de canal (Channel State Information CSI) de chaque sous-canal est nécessaire. La valeur estimée de la réponse du  $k^{\text{ème}}$  canal est calculée comme suit :

$$\hat{H}_k = \sum_{m=k-J/2}^{k+J/2} \frac{\hat{H}_m}{J}, \quad (31)$$

Où  $\hat{H}_m = Q_m/P'_m$  est l'estimation par les moindres carrés de la réponse du  $m^{\text{ème}}$  sous-canal, supposé actif. L'évaluation du schéma proposé est faite en rapport avec différents paramètres et par rapport à deux schémas existants, à savoir le schéma de détection dont nous nous sommes inspirés et le schéma basé sur la détection d'énergie. Les paramètres choisis sont en relation avec les facteurs à impact sur les performances, en termes de taux d'erreur moyen (TEM). Aussi, avons-nous choisis d'examiner l'impact des conditions radio et de leurs variations, de la probabilité de fausse détection fixée, du nombre de symboles des séquences d'entraînement, et des interférences causées par un utilisateur primaire unique vs plusieurs utilisateurs primaires. Le TEM est calculé en comparant les sous-canaux déclarés actifs par le récepteur avec ceux effectivement utilisés par le transmetteur secondaire. Pour se faire, on fixe une valeur pour la probabilité de fausse alarme puis on effectue les calculs avec les valeurs des symboles contenus dans les trames successives. A la fin, on fixe le seuil (pour la valeur de fausse alarme fixée et le nombre total de symboles utilisés) qui va permettre de distinguer entre les symboles ou canaux déclarés libres (ou actifs) et ceux qui sont déclarés occupés (ou inactifs). Nous avons, aussi, choisis une configuration dans laquelle les sous-canaux libres et occupés alternent dans chaque trame. Sachant que dans une configuration réelle on rencontre, vraisemblablement, plusieurs sous-canaux libres contigus qui viennent s'intercaler entre plusieurs autres sous-canaux occupés contigus, aussi, les performances dans cette configuration réelle devraient être meilleures. Sur les figures Figure.71 et Figure.72, sont illustrés les performances du schéma de détection proposé (en termes de TEM) versus le ratio "signal-to-noise ratio" SNR(dB), pour diverses valeurs de la *fausse alarme*, sur des canaux de communication suivant les modèles *AWGN* et *Ricean* respectivement. Le ratio "signal-to-interference ratio" SIR(dB) fixé à SIR=0dB, c.à.d. qu'on considère un environnement

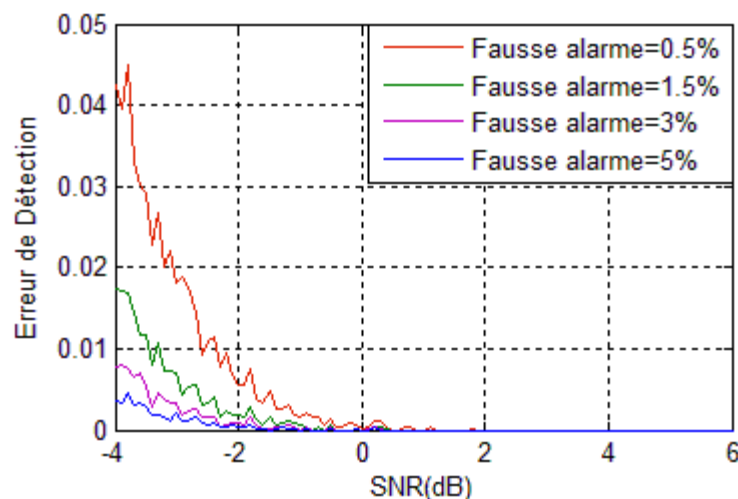


Figure 71 TEM vs SNRs(Db), diverse fausses alarmes (SIR=0Db), canal Bruit Additif Blanc Gaussien

radio dans lequel la puissance des interférences dans les sous-canaux occupés est égale à celle du signal modulant les symboles des séquences d'entraînement dans les sous-canaux libres.

Comme on peut le voir sur Figure.67, avec un SNR au-delà de 0dB les performances sont parfaites

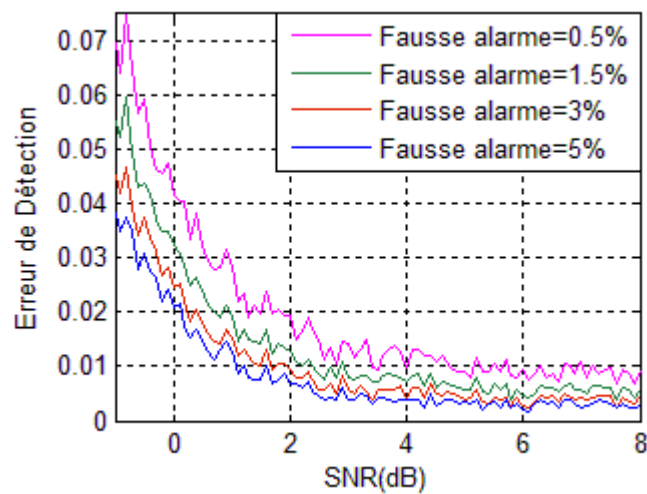


Figure 72 TEM vs SNRs(Db) diverses fausses alarmes, (SIR=0Db) canal Rician

sur un canal *AWGN* i.e. il y a une discrimination claire entre les deux hypothèses. Pour un canal *Rician*, Figure.72, et avec une valeur de la fausse alarme égale à 0.5%, le TEM passe sous le seuil de 2% pour des valeurs du SNR supérieures ou égales à 2dB. Il y a une nette détérioration des performances sous un canal *Rician* par rapport à un canal *AWGN*; mais si on tolère un TEM de 4%, des valeurs du SNR supérieures ou égales à 0dB sont acceptables. Avec une fausse alarme de 5%, le TEM reste inférieure à 5% à partir d'un SNR de -2dB ; ce qui montre que le schéma de détection reste robuste contre des conditions radio assez sévères. Compte tenu du fait que dans les réseaux cognitifs les USs sont contraint à limiter les puissances de leurs signaux d'émission (pour atténuer les interférences causées aux UPs) les résultats de Figure.71 et Figure.72 nous donnent des indications sur l'intervalle des valeurs du SNR qui réalise un compromis entre un bon TEM et une puissance d'émission acceptable. Ainsi, si on considère une fausse alarme de 3%, on peut obtenir un TEM inférieur à 5% pour des SNRs dans l'intervalle [-2dB, 6dB], par exemple. Cette information pourrait être utile quand il s'agira de décider de migration (ou non) vers une bande radio opératoire d'un réseau particulier.

Sur Figure.73, sont représentés les TEMs du schéma détection versus le SIR(dB), pour diverses valeurs du SNR(dB), une fausse alarme de 5%, et un canal *Rayleigh*. Le SIR (qui est un paramètre important caractérisant les conditions radio d'une communication), est défini comme le ratio de la puissance moyenne sur toutes les sous-porteuses libres (ou actives) sur les interférences moyennes sur toutes les sous-porteuses occupées (ou inactives). Les résultats obtenus, mettent en évidence la relation qu'il y a entre les puissances des trois signaux intervenants dans la transmission d'une

séquence d'entraînement, à savoir le signal modulant la séquence elle-même, le bruit au niveau de l'équipement du récepteur, et les interférences dues aux communications utilisateurs primaires. Ainsi, des pics du TEM peuvent être observés aux valeurs 0dB, 2dB, 4dB, 6dB, et 8dB du SIR pour les mêmes valeurs du SNR, respectivement, alors le TEM diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de

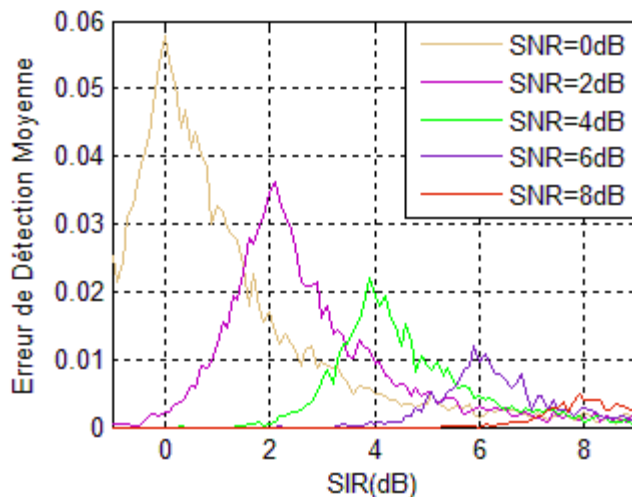


Figure 73 TEM vs SIR(Db) diverses valeurs SNR(Db)

ces valeurs. Cette information est précieuse, en ce sens qu'elle nous éclaire sur les rapports qu'on devrait maintenir entre les puissances des signaux susmentionnés pour espérer des TEMs bas. Concrètement, on devrait éviter les configurations dans lesquelles les valeurs des puissances des trois signaux soit proches l'une de l'autre. Par conséquent, le signal de transmission des séquences d'entraînement, qui est le seul dont on peut maîtriser la puissance, devra être maintenu à un niveau de puissance tel, que les ratios SNR et SIR soient différents ; condition qu'il possible de respecter.

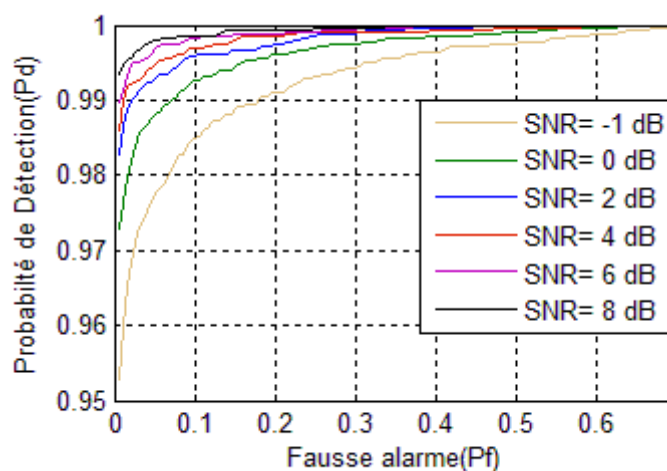


Figure 74 Probabilité de détection vs fausse alarme, diverses valeurs SNR(Db)

Les résultats de Figure.74, représentent les variations de la *probabilité de détection* en fonction de la variation de la probabilité la *fausse alarme*, pour diverses valeurs du SNR et un SIR=0dB. Ils nous renseignent sur le coût induit par l'atteinte de tels niveaux de performance. Comme il ressort de l'observation de cette figure, une amélioration de la *probabilité de détection* résulte automatiquement en une détérioration de la *fausse alarme*, et vice versa. On peut, toutefois, fixer des seuils de décision tels que les deux probabilités restent en dessous de 0.25%, avec un SNR=0dB ; ce qui confirme les résultats précédents. La figure montre qu'on peut améliorer les performances si on tolère des valeurs plus grandes de la *fausse alarme*, mais au prix d'une augmentation des interférences causées aux UPs, par les USs. Cependant, dans des conditions favorables cette incidence n'est pas trop gênante.

Ce qu'illustrent Figure.75 et Figure.76, c'est les résultats des performances réalisées versus le SNR(dB), pour diverses valeurs de la *fausse alarme*. L'élément nouveau, ici, est que nous voulons

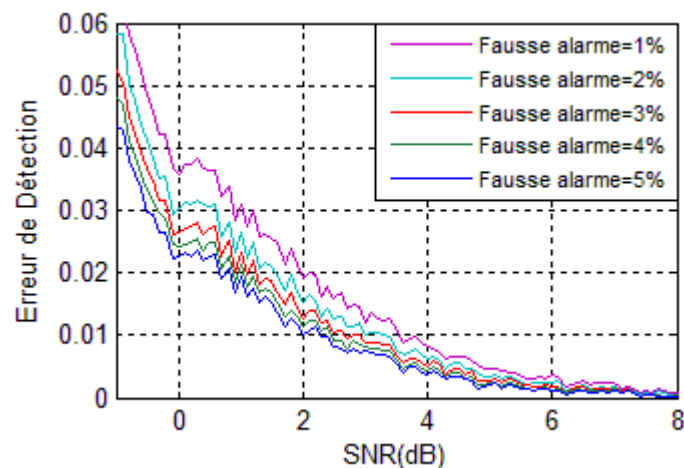


Figure 75 TEM vs SNR(Db), SIR=0Db, pour diverse valeurs fausse alarme, UP unique

nous approché, davantage, des situations de communications réelles. La simulation est, alors, faite sous l'impact d'interférences générées non pas à partir du modèle distribution Gaussienne, mais à partir des signaux de communication des UPs. Nous simulons des UPs transmettant dans les sous-canaux inactifs, qui ne sont donc pas utilisés par les USs, et utilisons ces signaux transmis comme interférences aux signaux transmis par les USs. Le but de ce scénario, étant de valider les résultats du schéma proposé dans le cas où l'hypothèse d'interférences Gaussiennes n'est plus vraie. Une comparaison entre les résultats représentés par Figure.75 et Figure.71, montre que lorsque les interférences sont générées, dans la simulation, par des UPs avec modulation uni-porteuse, les performances sont presque les mêmes que sous l'hypothèse d'interférences Gaussiennes. Dans le cas où les interférences sont générées par des UPs, avec une modulation multi-porteuses, on constate une légère dégradation des performances. Nous en concluons, que l'hypothèse Gaussienne (pour les

interférences) est acceptable, puisqu'elle s'applique à la modulation mono-porteuse, et que la dégradation des performances avec la modulation multi-porteuses n'est pas tellement importante pour qu'elle invalide cette dernière hypothèse.

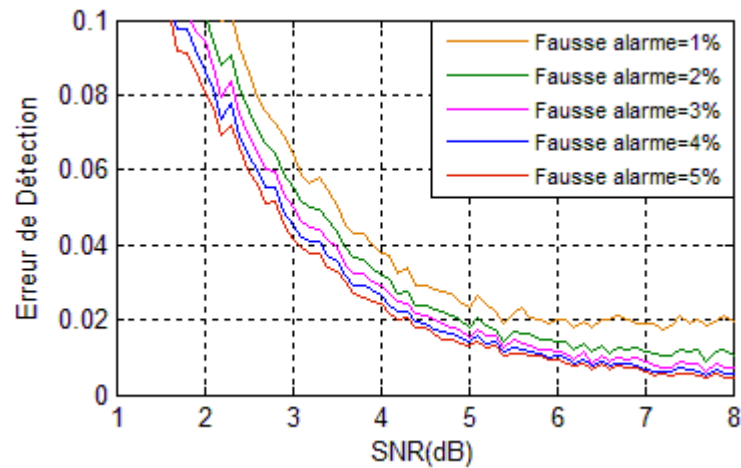


Figure 76 TEM vs SNR(Db), SIR=0Db, pour diverse valeurs fausse alarme, UPs multiples

L'autre point concernant l'évaluation des performances, est celui de l'influence du nombre de symboles impliqués dans le calcul de la probabilité à priori (PAP), dans le schéma de détection. Pour un maximum de précision, nous utilisons tous les symboles d'une unité d'OSR (dans notre cas  $J=32$ ). Cependant, Figure.77 montre que le calcul avec moins de symboles semble ne pas affecter cette précision, jusqu'à un certain niveau. Ce résultat, pourrait être exploité pour, d'une part, diminuer le temps des calculs (moins de symboles donc calculs plus rapides) et, d'autre part, combattre le décalage dans le temps entre le début de la trame des USs et celui de la trame de signalisation des UPs. Rappelons, que les SCCs qui annoncent l'occurrence d'une OSR permettent, en même temps, d'identifier l'instant de début de la trame correspondante. D'un autre côté, les USs qui communiquent avec leur SBC sont synchronisés sur l'instant de début de leurs trames de données. Il y a, donc, inévitablement un décalage entre les deux instants, et par conséquent un recouvrement partiel, au niveau de la SBC, entre les trames transportant les séquences d'entraînement (émises par les UPs) et les trames de données (émises par les USs). Ce recouvrement, partiel, entre ces deux types de trames affecte aussi bien les sous-canaux actifs que ceux inactifs. L'utilisation de moins de symboles pour le calcul de la PAP, évite d'inclure les symboles recouverts et, ainsi, maintenir la performance de la détection à un niveau acceptable. A cet égard, Figure.77 montre les performances avec différents nombres de symboles impliqués (24, 26, 28, 30, 32) et permet de bien voir que la dégradation des performances avec moins de symboles reste dans des proportions acceptables. Ce constat, nous envoie

un signe encourageant quant à la possibilité de recourir à de tel moyen pour réduire l'impact du décalage temporel, susmentionné, sur la dégradation des performances.

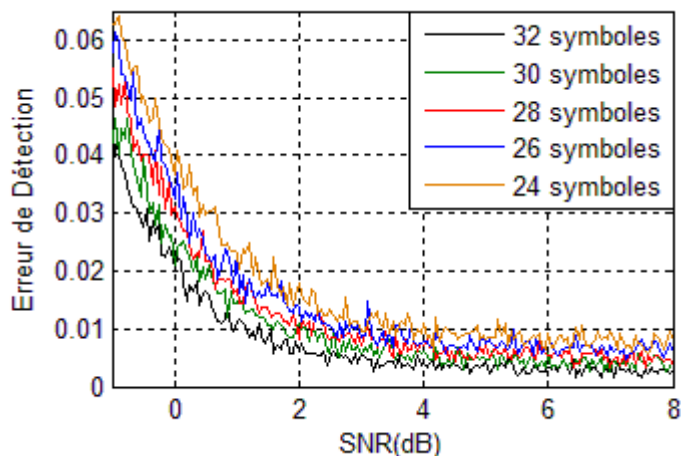


Figure 77 TEM vs SNR(Db) pour différents nombre de symboles

Nous avons déjà souligné que notre schéma de détection est inspiré par un autre schéma proposé dans [79], avec une adaptation au contexte du réseau I-CRICNet. Dans Figure.78, les résultats de la comparaison des performances des deux schémas sont présentés, pour diverses valeurs de la *fausse alarme*. Il apparaît, clairement, que notre schéma est plus performant (en termes de TEM) que le schéma d'inspiration, pour toutes les valeurs de la *fausse alarme* et pour toutes celles du SNR. Cet avantage s'ajoute à ceux déjà expliqués dans les chapitres précédents. L'origine du désavantage du

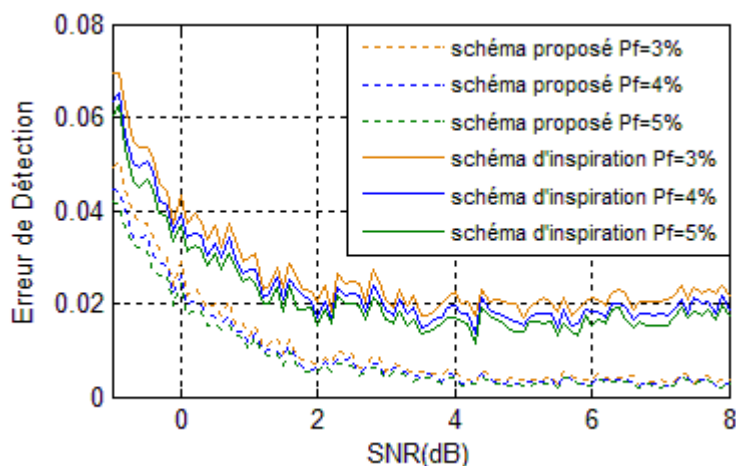


Figure 78 Comparaison schéma proposée et schéma d'inspiration

schéma d'inspiration est à imputer aux symboles situés aux bords sous-canaux actifs (et inactifs). En effet, dans le schéma dont nous nous sommes inspirés, il n'y a pas moyen de connaître les limites (bords) des sous-canaux logiques utilisés dans les trames OFDM. Par conséquent, il n'est pas possible

d'éviter, dans le calcul de la PAP, de mélanger des sous-canaux actifs avec des sous-canaux inactifs. Cela arrive, particulièrement, aux bords des limites entre les sous-canaux actifs et ceux inactifs. D'après les résultats de Figure.78, il ressort clairement que l'inclusion de symboles de bord dans les calculs dégrade les performances ; on constate même qu'avec plus de deux symboles de bord les performances se dégradent profondément. Cela paraît contre intuitif, mais rappelons que dans nos simulations nous avons choisi d'alterner les sous-canaux actifs et inactifs dans chaque trame, et que donc les chances qu'on a de rencontrer des symboles de bords sont élevées. Dans les situations réelles, on a moins de chances de rencontrer ces situations, mais elles existeront toujours et impacteront les performances tout de même.

Au chapitre.3, nous avons étendu notre schéma de détection pour le rendre coopératif en nous inspirant d'un autre schéma, basé sur la détection d'énergie [76]. Pour pouvoir comparer les

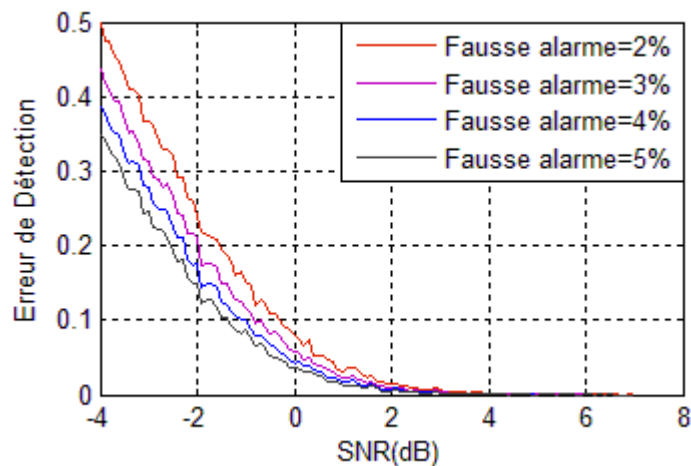


Figure 79 Schéma de détection proposé vs Détection d'énergie (canal Bruit Gaussien Blanc Additif)

performances des deux propositions nous avons besoin de comparer les performances de leurs schémas de base. Sur Figure.79 et Figure.80, sont représentés les TEMs versus le SNR(dB) pour diverses valeurs de la *fausse alarme*, et sur des canaux de communication suivant les modèles *AWGN* et *Ricean* respectivement. Le ratio "signal-to-interference ratio" SIR(dB) fixé à SIR=0dB. En se référant à Figure.71 et Figure.72, respectivement, on peut constater la nette supériorité des performances de notre schéma de base par rapport au schéma basé sur la détection d'énergie. Ce résultat nous aidera à comparer les performances de notre schéma de détection coopératif par rapport à celui qui nous a inspiré.

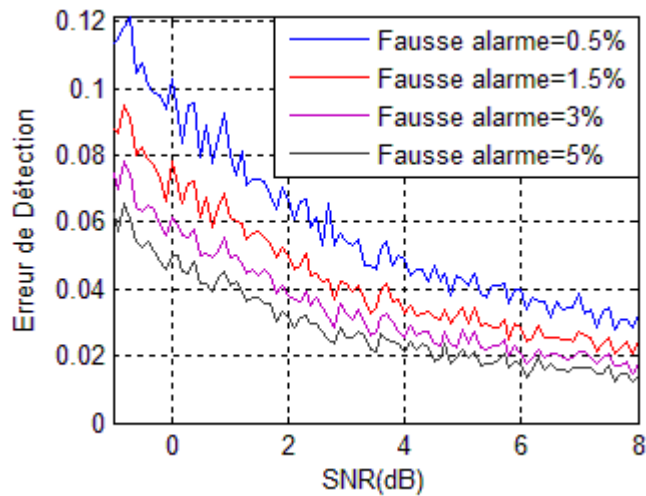


Figure 80 Schéma de détection proposé vs Détection d'énergie (canal Rician)

## 4.2 Etude des performances du schéma de détection coopératif

Dans cette section, et suivant [76] [68], nous allons étudier les performances du schéma de détection coopératif présenté au chapitre.3. L'étude comprend la formulation de la *probabilité de détection*, de la *fausse alarme*, du *débit moyen*, et de la *consommation d'énergie*. Pour la clarté de l'exposé, nous commencerons par définir le modèle du système étudié et les notations utilisées.

### 4.2.1 Modèle du système

Le système étudié représenté sur Figure.81, se compose de deux réseaux, le réseau I-CRICNet et un réseau primaire sans-fil dans lequel les communications se font avec la méthode d'accès OFDM. Les utilisateurs du réseau primaire sont dénotés par "UPs", et leur station de base primaire par "SBP". Les utilisateurs du réseau I-CRICNet sont dénotés par  $S_i, i = 1, \dots, N$ , et leur station de base cognitive par "SBC", qui est aussi le centre de fusion (F) qui reçoit la décision de l'utilisateur secondaire supérieur ( $S_{sup}$ ), quant à la présence ou absence d'un trou spectral, la fusionne avec sa propre décision pour prendre une décision globale (finale). Nous désignons par  $h_{s_i F}$  et  $h_{PF}$  le coefficient d'évanouissement du canal entre  $S_i, i = 1, \dots, N$  et le centre de fusion F, et UP et F, respectivement. De même, nous dénotons par  $\gamma_{s_i}$  et  $\gamma_P$  la ratio SNR sur le lien entre  $S_i, i = 1, \dots, N$  et le centre de fusion F, et UP et F, respectivement.

Dans les système OFDMA, chaque station mobile (SM) se voit allouée un sous-ensemble, seulement, de toutes les sous-porteuses. Les sous-porteuse disponibles sont groupées en sous-canaux, et les SMs

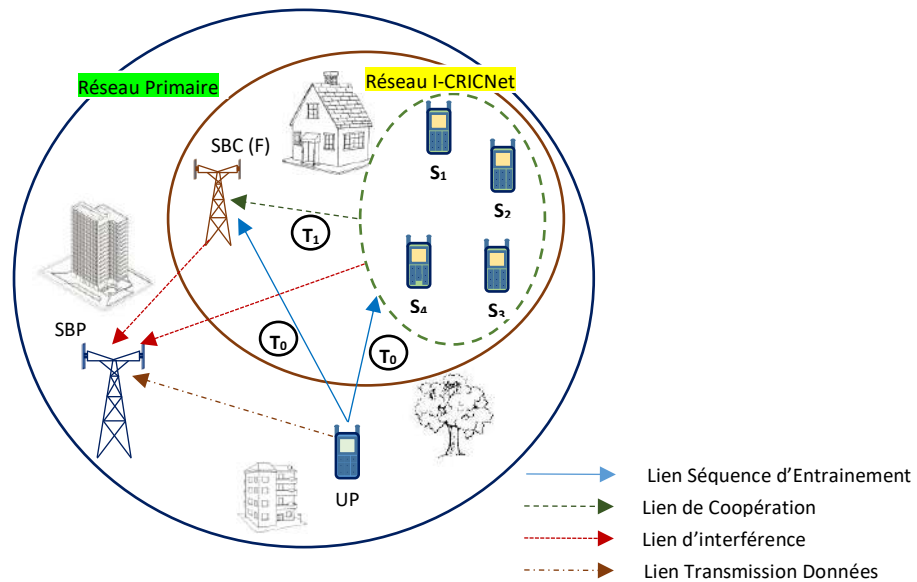


Figure 81 Coexistence I-CRICNet et un réseau primaire OFDMA

reçoivent, chacune, un ou plusieurs des ces sous-canaux pour une durée de plusieurs symboles [80]. Le groupement des sous-porteuses en sous-canaux se fait selon un certain nombre de manières, selon les réseaux particuliers existants, et y constituent les unités d'allocations des ressources radio. Dans le réseau WiMAX, par exemple, Les utilisateurs reçoivent un nombre variable de "slots". Dans Figure.82, on peut constater qu'un "slot" consiste en 6 "tiles", et que chaque "tile" consiste en 4 sous-

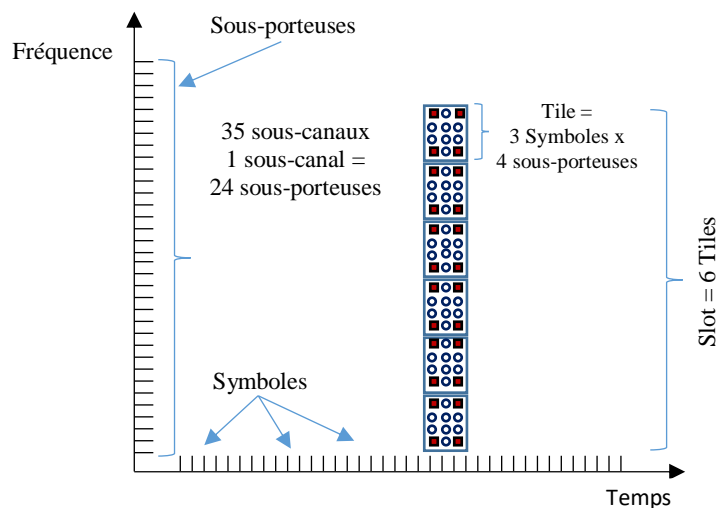


Figure 82 Sous-canaux constituant l'unité d'allocation des ressources

porteuses sur une durée de 3 symboles. Sur les 12 combinaisons sous-porteuses-symboles dans un "tile", 4 sont utilisées pour les pilotes et 8 pour les données. Le "slot", donc, consiste en 24 sous-porteuses sur une durée de 3 symboles. Les 24 sous-porteuses forment un sous-canal et, ainsi, dans une bande de 10MHz les 1024 sous-porteuses forment 35 sous-canaux. Dans les réseaux LTE, l'équivalent du slot est le bloc de ressource (BR). En effet, les ressources radio sont allouées par paires

de blocs de ressources (BR), où chaque BR s'étale en fréquence sur 12 sous-porteuses et en temps sur 7 symboles (0.5ms). On peut, donc, dire que l'unités d'allocation de ressources dans ce réseau est une combinaison de 12 sous-porteuses x 1ms.

### 4.3 Analyse de performances du Sschéma de détection coopératif

Rappelons que, dans notre proposition, la durée qui correspond à la phase de capture dans les réseaux cognitifs est réduite à la transmission d'une SCC suivie d'une séquence de symboles d'entraînement qui s'effectuent en un temps  $T_0 = \tau$ . Lorsque le centre de fusion F (SBC) décide en faveur de l'hypothèse  $H_0$  ( $\theta = 0$ ), il déclenche un phase de coopération, et le  $S_{sup}$  est sélectionné à partir de l'ensemble de détection, pour coopérer, en un temps  $T_1$ . Le  $S_{sup}$ , peut être décrit par :

$$S_{sup} = \arg \max_{S_i \in \Omega} = \left( \frac{\gamma_{S_i} |h_{S_i F}|^2}{1 + \theta \gamma_P |h_{PF}|^2} \right) = \arg \max_{S_i \in \Omega} \left( \gamma_{S_i} |h_{S_i F}|^2 \right) \quad (32)$$

où,  $\Omega = \{S_i : S_i \text{ décide } H_1\}$  est l'ensemble de détection, obtenu pendant la durée de temps  $T_1$ , c.à.d. les USs qui détectent la présence d'un UP. Chaque US  $\{S_i \in \Omega\}$  règle un temporisateur local (à la fin de  $T_0$ ), avec à une valeur  $\{t_i, S_i \in \Omega\}$  qui est inversement proportionnelle à son SNR reçu,  $\gamma_{S_i} |h_{S_i F}|^2$  [76], i.e.  $t_i = \frac{\omega}{\gamma_{S_i} |h_{S_i F}|^2}$ , pour une valeur réelle donnée de  $\omega$ . C'est le  $S_{sup}$ , seulement, qui envoie sa décision au centre de fusion, puisque son temporisateur expire le premier. Les autres USs qui attendent les expirations de leurs temporisateurs locaux se retiennent dès qu'ils captent une transmission du  $S_{sup}$ .

Les probabilités de *détection* et de *fausse-alarme* (du schéma de base) chez le centre de fusion ( $P_{d,F}^{ShB}, P_{f,F}^{ShB}$ ) et celles chez les USs ( $P_{d,S_i}^{ShB}, P_{f,S_i}^{ShB}$ ) sont données, respectivement, comme :

$$P_{d,F}^{ShB} = R_d r_d, \text{ et } P_{d,S_i}^{ShB} = R_{d,S_i} r_{d,S_i}, i = 1, \dots, N$$

$$P_{f,F}^{ShB} = P_{f,S_i}^{ShB} = R_f (r_f + r_d),$$

où,  $R_d, R_f, r_f, r_d$  sont, respectivement, les probabilités de détection et de fausse-alarme des sous-canaux de base, et les probabilités de détection et de fausse-alarme des SCCs, au niveau de F ( $R_{d,S_i}, r_{d,S_i}$  au niveau des  $S_i, i = 1, \dots, N$ ). Lorsque F déclenche la coopération, il s'attend à recevoir une seule contribution (celle de  $S_{sup}$ ) pendant  $T_1$ , pour qu'il l'intègre à la prise décision globale. Dans ce schéma coopératif (*ShC*), la probabilité pour que F reçoive de  $S_{sup}$  une décision en faveur de  $H_1$  alors que c'est  $H_0$  qui vraie, est donnée par [76] :

$$P_{f,C,1}^{ShC} = \sum_{i=1}^{2^N - 1} \left[ \prod_{S_i \in \Omega_i} P_{f,S_i}^{ShB} \prod_{S_m \in \bar{\Omega}_i} (1 - P_{f,S_m}^{ShB}) \right] = 1 - (1 - P_{f,S_i}^{ShB})^N \quad (33)$$

Ici,  $\Omega_i$  est la  $i^{\text{ème}}$  combinaison d'éléments possible parmi le nombre d'éléments total  $2^N$  de l'ensemble de détection  $\Omega$ , et  $\bar{\Omega}$  le complément de l'ensemble  $\Omega$ . Suivant [68], la probabilité totale de la fausse-alarme au niveau du centre de fusion F (SBC) pour notre schéma coopératif est :

$$P_f^{ShC} = P_{f,F}^{ShB} + (1 - P_{f,F}^{ShB})P_{f,C,1}^{ShC}$$

De la même manière, la probabilité pour F reçoive correctement les décisions des autres USs  $S_i, i = 1, \dots, N$  en faveur de  $H_1$  est donnée par :

$$P_{d,C,1}^{ShC} = \sum_{i=1}^{2^N-1} \left[ \prod_{S_i \in \Omega_i} P_{d,S_i}^{ShB} \prod_{S_m \in \bar{\Omega}_i} (1 - P_{d,S_m}^{ShB}) \right] = 1 - (1 - P_{d,S_i}^{ShB})^N \quad (34)$$

suite à quoi, la probabilité finale de détection de  $ShC$  est calculée comme suit :

$$P_d^{ShC} = P_{d,F}^{ShB} + (1 - P_{d,F}^{ShB})P_{d,C,1}^{ShC}$$

Rappelons, encore une fois, que les formulations de probabilités données ci-dessus concernent les sous-canaux constituant l'unité d'allocation des ressources dans un réseau OFDM ou OFDMA, tels que les slots ou BRs.

#### 4.4 Formulation de la consommation d'Energie et du Débit Moyen

Dans cette section nous allons donner, respectivement, la formulation du débit moyen réalisable sur une unité d'allocation de ressources (UAR), et de la consommation d'énergie entraînée par sa capture et sa détection. Dans le contexte du système étudié, le calcul du débit moyen réalisable doit tenir compte de l'appréciation, faite par l'UP et les USs de leurs interactions mutuelles, qui fait naître les quatre situations suivantes :

*Situation1* : Cette situation se présente lorsqu'une UAR donnée est occupée (hypothèse  $H_1$ ) et que le réseau (I-CRICNet) décide qu'elle l'est. On arrive à cette situation dans deux cas ; soit la SBC décide en faveur de  $H_1$  (à la fin de  $T_0$ ), soit elle déclare à tort que l'UAR est libre (hypothèse  $H_0$ ) mais est corrigée par  $S_{sup}$  en faveur de  $H_1$  (à la fin de  $T_1$ ). Les deux cas se produisent avec les probabilités  $P(H_1)P_{d,F}^{ShB}$  et  $P(H_1)(1 - P_{d,F}^{ShB})P_{f,C,1}^{ShC}$ , respectivement. Le débit réalisable est nul, puisque l'UAR n'est pas utilisée pour la transmission de données.

*Situation2* : Cette situation est rencontrée dans le cas où UAR donnée est libre (hypothèse  $H_0$ ) mais que le réseau (I-CRICNet) décide qu'elle ne l'est pas (hypothèse  $H_1$ ). Deux cas peuvent conduire à cette situation ; soit que c'est la SBC qui déclenche une fausse-alarme en déclarant  $H_1$ , soit que la SBC décide correctement en faveur de  $H_0$  mais que  $S_{sup}$  déclare à tort  $H_1$ . Les deux cas précédents

se produisent avec les probabilités  $P(H_0)P_{f,F}^{ShB}$  et  $P(H_0)(1 - P_{f,F}^{ShB})P_{f,C,1}^{ShC}$ , respectivement. Puisque le réseau perd une occasion de transmission dans ce cas, le débit réalisable va diminuer de  $-\rho C_{uar}T_{uar}$ , où  $\rho$  est un facteur de pénalité choisi,  $C_{UAR}$  le taux moyen de transmission d'un US dans une UAR, et  $T_{UAR}$  la durée d'une UAR [76].

*Situation3* : Cette troisième situation couvre le cas où la SBC et le  $S_{sup}$ , tous les deux, décident incorrectement que l'UAR est libre (hypothèse  $H_0$ ) alors qu'en réalité elle est occupée (hypothèse  $H_1$ ). Ce cas se produit avec une probabilité de  $P(H_0)(1 - P_{d,F}^{ShB})(1 - P_{d,C,1}^{ShC})$ . A ce moment-là, le réseau transmet des données et cause des interférences aux UPs. Cependant, même si c'est le cas, un débit partiel de  $k_c C_{uar}T_{uar}$  unités est réalisable, pour une certaine valeur  $0 \leq k_c < 1$  [76].

*Situation4* : Enfin, cette dernière situation correspond au cas où le débit est maximal. Aussi bien la SBC que le  $S_{sup}$  prennent la bonne décision en déclarant l'UAR libre lorsqu'elle l'est effectivement (hypothèse  $H_0$ ). La probabilité associée à ce cas de figure est  $P(H_0)(1 - P_{f,F}^{ShB})(1 - P_{f,C,1}^{ShC})$ . Le débit réalisable est  $C_{uar}T_{uar}$ .

#### 4.4.1 Débit moyen

Maintenant que toutes les situations possibles dont peut résulter la phase de capture et de détection d'une UAR ont été recensées et que leurs probabilités de réalisation formulées, on peut dire que pour le schéma-de-détection coopératif proposé le débit moyen réalisable est donné par :

$$\begin{aligned}
D^{ShC} = & P(H_0)(1 - P_{f,F}^{ShB})(1 - P_{f,C,1}^{ShC})C_{uar}T_{uar} + \\
& k_c P(H_0)(1 - P_{d,F}^{ShB})(1 - P_{d,C,1}^{ShC})C_{uar}T_{uar} - \\
& \rho P(H_0)[P_{f,F}^{ShB} + (1 - P_{f,F}^{ShB})P_{f,C,1}^{ShC}]C_{uar}T_{uar}, \text{ pour } 0 \leq k_c < 1 \text{ et } \rho \geq 0 \quad (35)
\end{aligned}$$

Cette formule est obtenue en sommant les débits réalisables, dans chacun des cas identifiés dans les situations sus présentées, pondérés par leurs probabilités de réalisation.

#### 4.4.2 Consommation d'énergie

Dans notre réseau I-CRICNet, chaque US consomme de l'énergie pour capturer et détecter les OSRs, support des communications. Dénotons par  $P_s$  la puissance requise pour chaque US pour traiter les SCCs (corrélation croisée) et les séquences de symboles d'entraînement (détection), et par  $P_t$  la puissance requise pour transmettre la décision du SU au centre de fusion (SBC), en cas de

coopération. Dans notre schéma-de-détection coopératif, l'énergie consommée par chaque US dans chacune des situations sus présentées est donnée par le tableau Tableau.4 [76]:

Tableau 4 Energie et débit pour le schéma coopératif

<i>Schéma-de-capture-et-de-détection coopératif</i>		
<i>Cas</i>	<i>Energie(joules)</i>	<i>Débit(bits/Hz)</i>
$P(H_1)P_{d,F}^{ShB}$	$P_s T_0$	0
$P(H_1)(1 - P_{d,F}^{ShB})P_{f,C,1}^{ShC}$	$P_s T_0 + P_t T_1$	0
$P(H_0)P_{f,F}^{ShB}$	$P_s T_0$	$-\rho C_{uar} T_{uar}$
$P(H_0)(1 - P_{f,F}^{ShB})P_{f,C,1}^{ShC}$	$P_s T_0 + P_t T_1$	$-\rho C_{uar} T_{uar}$
$P(H_0)(1 - P_{d,F}^{ShB})(1 - P_{d,C,1}^{ShC})$	$P_s T_0 + P_t T_1$	$k_c C_{uar} T_{uar}$
$P(H_0)(1 - P_{f,F}^{ShB})(1 - P_{f,C,1}^{ShC})$	$P_s T_0 + P_t T_1$	$C_{uar} T_{uar}$

En définitive, la consommation d'énergie pour la capture et la détection dans le schéma coopératif est donnée par :

$$E^{ShC} = U_c P_s T_0 + V_c P_t T_1, \text{ où}$$

$$U_c = P(H_1)P_{d,F}^{ShB} + P(H_1)(1 - P_{d,F}^{ShB})P_{f,C,1}^{ShC} + P(H_0)P_{f,F}^{ShB} + P(H_0)(1 - P_{f,F}^{ShB})P_{f,C,1}^{ShC} + P(H_0)(1 - P_{d,F}^{ShB})(1 - P_{d,C,1}^{ShC}) + P(H_0)(1 - P_{f,F}^{ShB})(1 - P_{f,C,1}^{ShC}) \quad (36)$$

et

$$V_c = P(H_1)(1 - P_{d,F}^{ShB})P_{f,C,1}^{ShC} + P(H_0)P_{f,F}^{ShB} + P(H_0)(1 - P_{f,F}^{ShB})P_{f,C,1}^{ShC} + P(H_0)(1 - P_{d,F}^{ShB})(1 - P_{d,C,1}^{ShC}) + P(H_0)(1 - P_{f,F}^{ShB})(1 - P_{f,C,1}^{ShC}) \quad (37)$$

Les deux résultats précédents nous permettent de formuler l'efficacité de l'énergie (mesurée en bits/Hz/J) du schéma coopératif, qui est exprimée par :

$$Eff^{ShC} = \frac{D^{ShC}}{E^{ShC}}$$

#### 4.5 Analyse de l'interférence Co-canal

C'est un fait établi que les interférences représentent la cause majeure de la dégradation des performances dans les réseaux sans fils. Cet aspect nous concerne d'autant plus que notre réseau I-CRICNet est inspiré des réseaux radio-cognitive. Dans ces réseaux, rappelons-le, les USs ont l'obligation d'éviter d'altérer les communications de leurs homologues UPs, en prenant le plus grand soin de ne pas trop interférer avec elles, au cas une. En gros, on distingue deux types d'interférence : les interférences Co-canal et les interférences canal-adjacent. Le premier type renvoi au cas où des transmetteurs différents émettent sur le même canal, alors que le second type au cas où ceux-ci émettent sur des canaux adjacents. Il est vrai que dans les réseaux radio-cognitive (en fait dans leur

version "overlay") les USs communiquent dans les canaux non occupés par les UPs et, par conséquent, ne devraient pas causer d'interférences Co-canal. Il y a, cependant, des situations où ce phénomène est inévitable, par nature, comme dans les versions "underlay" et "interwave" [15]. Dans ces deux derniers cas de figure, des dispositions devraient être prises pour ne pas causer d'interférence induite, aux UPs, ou du moins de la maintenir à un niveau acceptable.

Cette section traite cet aspect, dans le cadre du réseau I-CRICNet, sous l'angle de l'analyse des interférences (au niveau d'une SBP donnée) causées dans les canaux utilisés pour les communications opportunistes. Cette analyse, permet à la SBC d'une part de mettre en place un mécanisme de contrôle des puissances de transmission dans ces canaux et d'autre part de reconnaître la nécessité de déclencher la migration vers une autre BOA, lorsque les interférences deviennent importantes et/ou durent assez longtemps. Ces deux mesures (avec d'autres dispositions) peuvent permettre d'atténuer les nuisances que peuvent subir les communications primaires du fait des communications opportunistes. L'analyse des interférences dans les réseaux sans fil est rendue difficile par la complexité de l'environnement de propagation des signaux et par la nature aléatoire inhérente aux emplacements des utilisateurs. En effet, la performance d'un réseau sans fil dépend fortement des emplacements des nœuds utilisateurs, lesquels emplacements sont sujets à une grande incertitude. Ils, peuvent, donc, être modélisés comme un processus ponctuel stochastique dans un espace à deux/trois dimensions, comme cela apparaît dans les travaux modernes. Le domaine des mathématiques qui offre de tels modèles, avec les méthodes d'analyse de leurs propriétés, est la géométrie stochastique ; plus particulièrement la théorie des processus ponctuels. Grosso modo, un processus ponctuel est une collection aléatoire de points qui occupent un espace donné.

La modélisation et l'analyse des réseaux sans fil sont, donc, une application naturelle de la géométrie stochastique, comme par exemple l'élaboration de modèles (et l'analyse) des interférences dans ces systèmes sans fil, où le nombre et l'emplacement des nœuds transmetteurs et récepteurs ne peuvent pas être facilement prédits et/ou contrôlés.

Un modèle largement accepté qui caractérise la distribution spatiale des nœuds dans un réseau sans fil est le processus ponctuel de Poisson (Poisson Point Process, PPP). Un tel processus dans un espace à deux dimensions est défini comme suit :

**Définition :** Un processus spatial de Poisson, avec une intensité uniforme  $\beta > 0$ , est un processus ponctuel dans  $R^2$  tel que :

- i. Pour chaque ensemble borné fermé  $B$ , le nombre de points  $N(B)$  dans  $B$  suit une loi de Poisson de paramètre  $\beta A(B)$ , où  $A(B)$  dénote l'aire de  $B$ ;
- ii. Si  $B_1, \dots, B_m$  sont des régions disjointes, alors  $A(B_1), \dots, A(B_m)$  sont indépendants.

Il s'avère que ces deux propriétés caractérisent de manière unique le processus de Poisson. La constante  $\beta$  est le nombre de points prévus par unité d'aire. Elle a les dimensions longueur<sup>-2</sup> ou "points par unité d'aire". Un fait important concernant un processus de Poisson est qu'étant donné  $n$  points du processus de Poisson dans  $W$ , ces points sont conditionnellement indépendants et uniformément distribués dans  $W$  [81].

Pour générer une réalisation d'un processus de poisson d'intensité  $\beta$  dans  $W$ , on génère d'abord une variable aléatoire  $M$  avec une distribution de Poisson de moyenne  $\beta A(W)$ . Etant donné  $M = m$ , on génère ensuite  $m$  points aléatoires uniformes dans  $W$  Figure.83.

Réalisation d'un processus ponctuel de Poisson homogène dans une unité carrée, avec une fonction d'intensité  $\beta(x, y) = \exp(2 + 5x)$ .

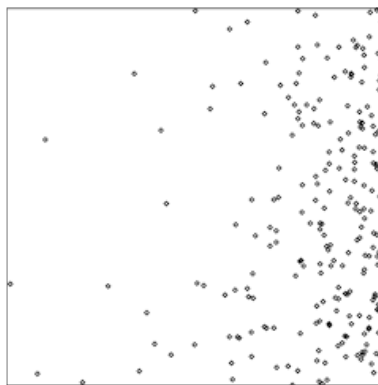


Figure 83 Réalisation d'un processus ponctuel de Poisson homogène

#### 4.5.1 Modèle du système

Dans ce modèle, nous avons une SBP dans le centre  $O$  et, à une distance  $h$ , une SBC dans le centre  $O'$ . Les USs émetteurs évoluent dans une zone circulaire de rayon  $R_s$  (région grise) et ont une distribution spatiale caractérisée par un PPP homogène d'intensité  $\lambda$  [82, 83]. La zone hachurée, d'aire  $A(d)$ , est l'intersection entre la zone grise et le disque de rayon  $d$  et de centre  $O$ . Elle contient les USs rattachés à la SBC qui sont à une distance  $D$  inférieure ou égale à  $d$ , de la SBP. La probabilité que  $D \leq d$  est donnée par :

$$P\{D \leq d\} = \frac{A(d)}{A} \quad (38)$$

où  $A$  est l'aire du disque gris dans Figure.84.

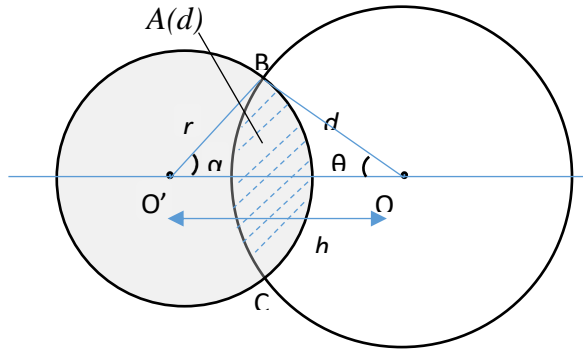


Figure 84 Modèle système pour l'analyse des interférences

Les signaux interférant subissent un affaiblissement de propagation (Path-Loss) et un évanouissement de Rayleigh (Rayleigh fading). Nous considérons un affaiblissement de propagation simplifié [82], où la puissance reçue d'un transmetteur à une distance  $r$  est donnée par  $P_r = Pr^{-\alpha}$ , où  $\alpha$  est l'exposant du l'affaiblissement de propagation considéré et  $P$  le niveau de puissance émise, donné par  $P = P_r r^\alpha$ . Pour l'évanouissement de Rayleigh, la PDF du gain de puissance du canal  $i$  ( $h_i$ ) est donnée par  $f_{|h_i|^2}(x) = e^{-x}$ ,  $0 \leq x \leq \infty$ .

L'interférence causée par un US sur le canal  $i$ , peut être écrite comme :

$$I_i = P_i |h_i|^2 d_i^{-\alpha} \quad (39)$$

où,  $d_i$  et  $P_i$  sont, respectivement, la distance de l'US à la SBP et, et la puissance de transmission de cet US sur le canal  $i$ . L'agrégat des interférences sur une band de  $N$  canaux est donné par :

$$I = \sum_{i=1}^N I_i$$

et la valeur de l'interférence moyenne sur un canal  $i$ , est dénotée par  $E[I_i]$  dans la suite.

Pour la détermination de  $E[I_i]$ , nous allons recourir à la fonction génératrice de moments (FGM) de  $I_i$ . La FGM est définie comme :

$$M_{I_i}(s) = E[e^{-sI_i}] \quad (40).$$

La FGM est utile pour deux raisons :

- i. elle nous donne tous les moments d'une variable aléatoire donnée, c'est pourquoi elle est appelée fonction génératrice de moments ;
- ii. lorsqu'elle existe, elle détermine de manière unique la distribution de cette variable, c.à.d. que si deux variables aléatoires ont la même FGM, alors elles doivent avoir la même distribution.

Ainsi, si on trouve la FGM d'une variable aléatoire, on aura certainement déterminé sa distribution. Cette méthode s'avère très utile lorsqu'on travaille sur les sommes de plusieurs variables aléatoires indépendantes.

## 4.5.2 Analyse de l'interférence moyenne par canal

L'objectif de cette sous-section, est de fournir une analyse exacte de l'interférence moyenne par canal, dans une aire finie de I-CRICNet, pour deux schémas de contrôle de puissance de transmission, distincts. Ces schémas sont basés sur [82] : 1) la puissance moyenne reçue des USs  $P_m$  2) en plus de  $P_m$  un seuil constant, de niveau-puissance est imposé  $P_s$ .

### A. Schéma 1

Dans ce premier schéma de contrôle, la SBC essaye de maintenir le niveau de la puissance moyenne reçue des USs qui lui sont rattachés à une valeur donnée, disons  $P_m$ . Dans ce cas de figure, la puissance de transmission sur le canal  $i$ , est donnée par  $P_i = P_m r_i^\alpha$ . En substituant  $P_i$  dans (40) et en tenant compte de l'indépendance de  $|h_i|^2$ ,  $r_i$ , et  $d_i$ , l'écriture de  $M_{I_i}(t)$  devient comme suit :

$$M_{I_i}(s) = E_{|h_i|^2, r_i, r_d} [e^{-tI_i}] = E_{r_d} \left[ E_{r_i} \left[ E_{|h_i|^2} [e^{-tP_m r_i^\alpha d_i^{-\alpha} |h_i|^2}] \right] \right] \quad (41)$$

Après calcul de l'espérance par rapport à  $|h_i|^2$ , on aboutit à :

$$M_{I_i}(s) = E_{r_d} \left[ E_{r_i} \left[ \frac{1}{1+tP_m r_i^\alpha d_i^{-\alpha}} \right] \right]$$

Cependant, lorsque  $tP_m r_i^\alpha d_i^{-\alpha} < 1$ ,  $M_{I_i}(t)$  peut être écrit comme :

$$M_{I_i}(s) = E_{r_d} \left[ E_{r_i} \left[ \sum_{t=0}^{\infty} (-sP_m r_i^\alpha d_i^{-\alpha})^t \right] \right] \quad (42)$$

L'évaluation de  $E_{r_i}$  nécessite la connaissance de la distribution de  $r_i$ . Puisque les USs sont distribués selon un PPP, la FDP de  $r_i$  est donnée par :

$$f_R(r_i) = \begin{cases} 2 \frac{\pi r_i}{A_R}, & 0 < r_i \leq R \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (43)$$

où  $A_R$  est l'aire du disque gris de rayon  $R$ , Figure.72. Nous avons aussi besoin de connaître la distribution de  $d_i$  pour évaluer  $E_{d_i}$ . D'après le modèle du système choisi, la FDP de  $d_i$  est la suivante :

$$f_D(d_i) = \frac{A'(d_i)}{A_R} \quad (44)$$

où  $A'$  est la dérivée de  $A$ , c.à.d.  $A'(x) = dA(x)/dx$ . Rappelons que,  $A(x)$  est l'aire de la zone d'intersection entre le disque gris et celui de rayon  $x$  et centre  $O$  (zone hachurée) Figure.72. Les deux FDPs  $f_R(r_i)$  et  $f_D(d_i)$  étant définies nous pouvons continuer, pour obtenir  $M_{I_i}(s)$  comme suit :

$$M_{I_i}(s) = E_{r_d} \left[ E_{r_i} \left[ \sum_{t=0}^{\infty} (-sP_m r_i^\alpha d_i^{-\alpha})^t \right] \right] \quad (45)$$

$$= E_{r_d} \left[ \sum_{t=0}^{\infty} (-sP_m)^t d_i^{-\alpha t} E[r_i^{\alpha t}] \right] \quad (46)$$

Nous obtenons  $E[r_i^{\alpha t}]$  de la manière suivante :

$$\begin{aligned} E[r_i^{\alpha t}] &= \int_{-\infty}^{\infty} r_i^{\alpha t} f_R(r_i) dr_i \\ &= 2 \frac{\pi}{A_R} \int_{-\infty}^{\infty} r_i^{\alpha t + 1} dr_i \\ &= \frac{2\pi}{A_R} R^{\alpha t + 2} \end{aligned} \quad (47)$$

En substituant (47) dans (46) on arrive à :

$$M_{I_i}(s) = \sum_{t=0}^{\infty} \frac{2\pi}{A_R} R^{\alpha t + 2} (-sP_m)^t E[d_i^{-\alpha t}] \quad (48)$$

Cette fois ci, nous essayant d'obtenir  $E[d_i^{-\alpha t}]$  comme sous-indiqué :

$$\begin{aligned} E[d_i^{-\alpha t}] &= \int_{-\infty}^{\infty} d_i^{-\alpha t} f_D(d_i) dd_i \\ &= \int_{h-R}^{h+R} d_i^{-\alpha t} \frac{A'(d_i)}{A_R} dd_i \\ &= \frac{1}{A_R} \int_{h-R}^{h+R} d_i^{-\alpha t} A'(d_i) dd_i \end{aligned} \quad (49)$$

En substituant (49) dans (48) le résultat devient :

$$M_{I_i}(s) = \frac{2\pi}{A_R^2} \sum_{t=0}^{\infty} R^{\alpha t + 2} (-sP_m)^t \int_{h-R}^{h+R} d_i^{-\alpha t} A'(d_i) dd_i \quad (50)$$

Sachant que  $E[I_i]$  n'est autre que  $-dM_{I_i}(s)/ds|_{s=0}$  on peut écrire l'expression de celle-ci comme suit :

$$\begin{aligned} -dM_{I_i}(s)/ds &= -\frac{2\pi}{A_R^2} R^2 \int_{h-R}^{h+R} d_i^{-\alpha t} A'(d_i) dd_i \sum_{t=0}^{\infty} d (-sP_m R^\alpha)^t / ds \\ &= -\frac{2\pi}{A_R^2} R^2 \int_{h-R}^{h+R} d_i^{-\alpha t} A'(d_i) dd \left\{ \sum_{t=0}^{\infty} -t P_m R^\alpha (-sP_m R^\alpha)^{t-1} \right\} \end{aligned}$$

$$-dM_{I_i}(s)/ds|_{s=0} = \frac{2\pi}{A_R^2} R^{\alpha+2} P_m \int_{h-R}^{h+R} d_i^{-\alpha} A'(d_i) dd_i$$

d'où,

$$E[I_i] = \frac{2}{\pi} R^{\alpha-2} P_m \int_{h-R}^{h+R} d_i^{-\alpha} A'(d_i) dd_i \quad (51)$$

Il nous reste maintenant à donner l'expression de  $A'(d_i)$ . Remarquons que l'expression de  $A(d)$  est donnée par la formule suivante :

$$A(d) = 2 \left\{ \theta(d, r, h) d^2 + \alpha(d, r, h) r^2 - \frac{1}{2} h r \sin(\alpha(d, r, h)) \right\} \quad (52)$$

Quant à  $\theta(d, r, h)$  et  $\alpha(d, r, h)$ , ils peuvent être exprimés les deux formules suivantes :

$$\theta(d, r, h) = \cos^{-1} \left( \frac{d^2 + h^2 - r^2}{2dh} \right)$$

$$\alpha(d, r, h) = \cos^{-1} \left( \frac{r^2 + h^2 - d^2}{2rh} \right)$$

Bien qu'une formule qui permette une évaluation directe de (51) semble ne pas pouvoir être obtenue, comptes tenu de sa complexité, le recours à l'intégration numérique de (51) permet une évaluation rapide de  $E[I_i]$ . Pour ce qui est de l'expression de la moyenne de l'agrégat des interférences,  $E[I]$ , elle est donné par la relation suivante :

$$E[I] = \lambda A_R E[I_i].$$

Par conséquent,  $E[I]$  est pourra être exprimé par :

$$E[I] = 2\lambda R^\alpha P_m \int_{h-R}^{h+R} d_i^{-\alpha} A'(d_i) dd_i \quad (53)$$

## B. Schéma 2

Dans ce second schéma de contrôle, la SBC essaye toujours de maintenir le niveau de la puissance moyenne reçue des USs qui lui sont rattachés à une valeur donnée ( $P_m$ ), mais impose en plus de ne pas dépasser un niveau de puissance, de transmission, maximal autorisé,  $P_s$ . Les USs qui transmettent des niveaux supérieurs à ce niveau verront leurs transmissions interrompues.

L'interférence causée par un US sur le canal  $i$ , devra être changée dans ce cas et écrite comme :

$$I_i = Q_i P_i |h_i|^2 d_i^{-\alpha}, \text{ où } Q_i \text{ est défini comme suit :}$$

$$Q_i = \begin{cases} 1, & P_i < P_s \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Désignons par  $q_i$  la probabilité  $\Pr[P_i < P_s]$ , alors :

$$q_i = \Pr[P_m d_i^\alpha < P_s] = \frac{A \left( \left( \frac{P_s}{P_m} \right)^{-\alpha} \right)}{A_R} \quad (54)$$

En prenant la moyenne de  $M_{I_i}(s)$  par rapport à  $|h_i|^2$  puis  $Q_i$ , nous pouvons maintenant, écrire :

$$M_{I_i}(s) = E_{r_d} \left[ E_{r_i} \left[ 1 - q_i + \frac{q_i}{1 + tP_m r_i^\alpha d_i^{-\alpha}} \right] \right] \quad (55)$$

En continuant, par le calcul de la moyenne de  $M_{I_i}(s)$  par rapport à  $r_i$  et  $r_d$  on arrive à l'expression :

$$\begin{aligned} M_{I_i}(s) &= 1 - q_i + q_i \sum_{t=0}^{\infty} (-sP_m)^t \left( 2 \frac{\pi}{A_R} \int_{-\infty}^{\infty} r_i^{\alpha t + 1} dr_i \right) \left( \frac{1}{q_i A_R} \int_{h-R}^{h+R} d_i^{-\alpha} A'(d_i) dd_i \right) \\ &= 1 - q_i + \frac{2}{\pi R^2} \sum_{t=0}^{\infty} (-sP_m R^\alpha)^t \left( \int_{h-R}^{h+R} d_i^{-\alpha} A'(d_i) dd_i \right) \end{aligned} \quad (56)$$

$$-dM_{I_i}(s)/ds = 1 - q_i + \frac{2}{\pi R^2} \sum_{t=0}^{\infty} t (-P_m R^\alpha) (-sP_m R^\alpha)^{t-1} \left( \int_{h-R}^{h+R} d_i^{-\alpha} A'(d_i) dd_i \right)$$

$$-dM_{I_i}(s)/ds|_{s=0} = 1 - q_i - \frac{2}{\pi R^2} \sum_{t=0}^{\infty} P_m R^\alpha \left( \int_{h-R}^{h+R} d_i^{-\alpha} A'(d_i) dd_i \right)$$

$$E[I_i] = 1 - q_i - \frac{2}{\pi R^2} \sum_{t=0}^{\infty} P_m R^\alpha \left( \int_{h-R}^{h+R} d_i^{-\alpha} A'(d_i) dd_i \right) \quad (57)$$

$$E[I] = \lambda A_R E[I_i]$$

$$E[I] = \lambda \pi R^2 (1 - q_i) - 2\lambda \sum_{t=0}^{\infty} P_m R^\alpha \left( \int_{h-R}^{h+R} d_i^{-\alpha} A'(d_i) dd_i \right) \quad (58)$$

## 4.6 Conclusion

Ce chapitre est divisé en deux parties. La première donne les résultats des simulations menées pour évaluer les performances du schéma de détections des OSRs présenté au chapitre 3. Ces simulations, tentent d'évaluer le schéma sous différents aspects pour s'assurer de son intérêt. Les résultats obtenus son encourageant et nous incite à creuse encore plus la question. La deuxième partie du chapitre, commences par une formulation des probabilités de fausse alarme et de détection du schéma coopératif. Le résultat obtenu est ensuite utilisée pour formuler l'énergie consommée pour la détection coopérative d'une OSRs ainsi que le débit escompté dans une unité d'allocation de ressource. Nous avons aussi formulé l'interférence Co-canal que les communications opportuniste, dans I-CRICNet, causent au réseau primaire dont la bande est exploitée. Les résultats obtenus peuvent être utilisés pour mener des simulations plus approfondies.

---

# CONCLUSION

---

Dans cette thèse, nous proposons une architecture conceptuelle d'un réseau cellulaire d'inspiration radio-cognitive pour l'intégration de réseaux sans-fil hétérogènes (RSFHs), que nous appelons I-CRICNet, ainsi que les schémas protocolaires qui y sont mis à l'œuvre. Nous avons essayé de maintenir cette intégration dans le cadre des contraintes suivantes :

1. Rendre possible l'exploitation commune, via I-CRICNet, du spectre temporairement inutilisé (dans les réseaux sans fil intégrés) sans modifications significatives des infrastructures et protocoles de ces réseaux
2. Laisser à ces réseaux le plein contrôle sur leurs spectres (sous licence) respectifs
3. Permettre à I-CRICNet d'exploiter de manière opportuniste tout le spectre ainsi laissé à sa disposition
4. Offrir les moyens de coopération en cas de nécessité
5. Permettre à tous les utilisateurs de passer de leurs réseaux sans fil vers I-CRICNet et vice versa, de manière transparente.

Deux questions-clés de la problématique posée ont retenues notre attention. La première question est liée aux points suivants : i) collecter et partager le spectre, ii) être au fait du contexte, iii) assurer la coopération et la coexistence, vi) choisir l'infrastructure de réseau sous-jacente. Le deuxième aspect, est celui de la flexibilité, l'adaptabilité, et l'agilité.

Une première difficulté qu'il fallait surmonter, est celle de l'hétérogénéité des trous spectraux (que nous appelons opportunités de spectre radio OSRs). En effet, ce qui caractérise complètement les OSRs s'avère dépendre de la technologie d'accès réseau (TAR) particulière du réseau dans lequel ces

OSRs se produisent. Dans une première étape, nous avons donc analysé cinq TARs, largement utilisées dans les réseaux sans fils traditionnels (TDMA, CDMA, CSMA/CA, OFDMA, et SC-OFDMA), pour identifier, dans chaque cas, ce qui est essentiel pour déterminer complètement les OSRs correspondantes. Il en est ressorti que, la caractérisation des OSRs peut être réduite au strict nécessaire sous réserve de mettre à contribution les informations relatives au contexte de chaque réseau sans fil individuel. Finalement, c'est la *nature* des OSRs (c.à.d. ce qui peut être considéré comme telles), la prédictibilité de leurs *durées*, et le *motif général* selon lequel elles se produisent (dans une bande de spectre particulière) qui ont été retenus. Dans une deuxième étape, il était impératif d'uniformiser l'univers des diverses OSRs mentionnées ci-dessus. La clé de cette uniformisation du spectre réside dans le choix d'une TAR adéquate capable de supporter des schémas génériques à même d'opérer, de manière efficace, dans des environnements tels que I-CRICNet. La technologie OFDM, ou plus précisément la technologie OFDM non-contigüe (NC-OFDM), était un choix naturel vue la flexibilité qu'elle offre pour transmettre sur des portions-de-spectre non contigües (nombre variable de sous-porteuses), désactivant de manière adaptative (nulling) certaines sous-porteuses tout en utilisant d'autres, et l'aptitude à contrôler la puissance de transmission dans chaque portion, qu'elle permet. En d'autres termes, la technologie choisie a les ingrédients nécessaires pour contrôler les trois dimensions des OSRs, à savoir le temps, la fréquence, et la puissance. L'adoption de la NC-OFDM comme TAR dans notre réseau I-CRICNet impose de restructurer, en conséquence, la bande opérationnelle courante (BOC) avant son utilisation, pour satisfaire les besoins techniques, et permettre l'exploitation du spectre dans l'esprit de la technologie NC-OFDM. Par conséquent, lorsqu'on parle de restructuration du spectre cela signifie que quelle que soit la TAR originale utilisées par les utilisateurs des réseaux à intégrer pour accéder à la BOC (utilisateurs primaires, UPs), elle est considérée au niveau de la station de base cognitive (SBC) comme étant divisée en un nombre paramétrique de sous-porteuses et structurée en trames d'une durée paramétrique. Des communications opportunistes peuvent, alors, se dérouler dans les portions du spectre déclarées *libres*. Ainsi, l'avantage que nous en tirons est double : i) les communications en mode secondaire sont effectuées dans une seule TAR (NC-OFDMA), ii) toutes les OSRs (dans ce même mode) sont traitées de manière uniforme malgré leur hétérogénéité.

Le choix d'une architecture appropriée, est le second élément dont avons le souci. Sur le plan conceptuel, nous avons opté pour une architecture qui supporte la coopération (à divers niveaux) et qui confère au réseau la flexibilité, l'adaptabilité, et l'agilité nécessaires. Concrètement, cinq catégories d'acteurs entrent en jeu, à savoir les stations de base primaires (SBPs), les utilisateurs primaires (UPs), les micro-serveurs de bord (MSBs), les stations de base cognitives (SBCs), et les utilisateurs secondaires (USs). Une SBP, est une station de base habituelle (de l'un des réseaux sans

fil primaires intégrés par I-CRICNet), sauf qu'elle héberge en plus un MSB. Les SBCs, UPs, et USs, ont ceci de commun que ce sont des équipements dotés de deux systèmes d'antennes, qui fonctionnent en étroite collaboration. Avec ce choix, ces acteurs gagnent en agilité puisqu'ils peuvent communiquer et scruter l'environnement en même temps. Ils sont plus flexibles, puisque capables de communiquer sur deux bandes différentes simultanément. Enfin, ils peuvent s'adapter aux conditions du réseau et engager une coopération dès que le besoin se fait sentir. Une SBC à, en plus du rôle traditionnel de toute station de base d'un réseau sans fil, trois autres rôles principaux à savoir, la sélection de la bande de spectre qui aura le statut de BOA, la migration de la BOA vers une nouvelle, ainsi que la participation active au schéma de récolte et de compte-rendu des OSRs. Les équipements (EUs) des utilisateurs peuvent fonctionner en deux modes à savoir le mode primaire (dans lequel ils sont désignés par UPs) et le mode secondaire (dans lequel ils sont désignés par USs). Ces deux modes sont associés à deux interfaces physiques différentes de l'EU. La première interface est dédiée aux communications dans un seul des réseaux primaires composants le RSFH, avec sa TAR propre. La deuxième interface est dédiée aux communications dans I-CRICNet avec la TAR NC-OFDMA.

La description des choix de conception retenus serait incomplète sans la présentation du schéma de notification des événements dans I-CRICNet. C'est-à-dire, comment une source doit-elle procéder pour signaler, à un destinataire, l'occurrence d'un événement relatif à une OSR, et comment permettre à ce dernier d'interpréter correctement cet événement quel que soit le contexte courant.

Concrètement, la notification des événements repose sur une paire de primitives de base associées à une micro-base de données de contexte. La paire de primitives consiste en une primitive de signalement (obligatoire), et une primitive informative (optionnelle), complémentaire de la première. Essentiellement, ces primitives acheminent la configuration de l'utilisation du spectre, pour les besoins de la synchronisation de ce dernier. Par synchronisation de spectre, nous entendons la mise en conformité des vues qu'ont la source et le destinataire, de l'état courant du spectre.

Les primitives de signalement sont implémentées grâce à des séquences cross-corrélées SCCs. Les SCCs sont des mots-de-code binaires prédéfinis ressemblant à du pseudo-bruit, en cela qu'ils retiennent les propriétés statistiques du bruit blanc échantillonné, bien qu'ils soient générés de manière déterministe. Le recours à de telles séquences est motivé par leurs, très intéressantes, propriétés qui en font un outil tout indiqué pour nos besoins. Plus précisément :

- i. elles sont courtes, réduisant ainsi grandement la durée de leur transmission ;
- ii. elles sont détectées, via la cross-corrélation, au lieu d'être décodées comme les messages de contrôle, ce qui permet une détection fiable même à de faibles valeurs du ratio signal-to-interférence-plus-noise (SINR) ;

- iii. leur détection est presque instantanée, car ni le décodage ni le traitement des messages de contrôle ne sont nécessaires ;
- iv. vi) leur détection est possible même lors de la réception d'autres données.

L'interprétation des primitives de signalement (et donc des SCCs) dépend du contexte. A ce titre, nous avons besoin d'une représentation, de celui-ci, qui soit facilement et rapidement communicable, en plus d'être assez expressive. Dans notre proposition, le choix a porté sur une micro base de données pour stocker les descriptions du contexte des diverses bandes radio visitées du RSFH. Le paramètre BOA est utilisé pour accéder au contexte de la bande opérationnelle courante (sous licence). Cette base de données, est un ensemble d'enregistrements de quatre attributs relatifs à la fréquence, au temps, à la quantité tolérable, et à l'accès au spectre, respectivement. Les valeurs prédéfinies, que chaque attribut peut prendre, ont des sens spécifiques et guident la génération, transmission, et interprétation des SCCs (implémentant les deux primitives de base).

Le mécanisme opératoire du schéma de notification susmentionné est illustré à travers cinq scénarios, correspondants aux TARs les plus utilisées dans les réseaux actuels. A l'issue de cet exercice, l'on peut remarquer que notre schéma s'adapte de manière souple aux diverses situations, avec les mêmes outils, en s'acquittant de sa tâche de manière très correcte. Nous pensons même, qu'il n'est pas déplacé de le qualifier de "schéma générique" ; généralité qu'on aura l'occasion d'y revenir.

Dans les approches pour réseaux radio-cognitives (RRCs), l'une des fonctions importantes à assurer est la libération des portions du spectre radio dans lesquelles les communications opportunistes se déroulent, dès qu'un UP y est détecté. Dans I-CRICNet, cette fonction est prise en charge par les SBCs. Chaque SBC à, en plus du rôle traditionnel de toute station de base d'un réseau sans fil, trois autres rôles principaux, à savoir la sélection de la bande de spectre qui aura le statut de BOA, la migration de la BOA vers une nouvelle, ainsi que la participation active au schéma de collecte/compte-rendu des OSRs. Dans son premier rôle, chaque SBC a l'obligation de sélectionner, parmi les bandes de spectre des différents réseaux sans fil composant le RSFH, la bande de spectre qui va supporter les communications actuelles dans sa zone de couverture. Cette bande sera la Bande Opérationnelle Actuelle (BOA) que la SBC annoncera aux USs qui lui sont attachés. Une fois la BOA connue, la SBC jouera aussi son rôle (troisième) de collecte des ressources radio nécessaires au support des communications. La bande sélectionnée restera valide jusqu'à ce que la même SBC en décide autrement, en annonçant une nouvelle BOA (de la même manière qu'elle avait annoncé la bande précédente). Ainsi, au gré des conditions radio régnautes, la SBC va migrer d'une bande de spectre à une autre entraînant dans son sillage les USs qu'ils lui sont attachés. Chaque SBC

n'exploitera, donc, qu'une seule bande à la fois (parmi celles des différents réseaux sans fil composants le RSFH). Pour être plus précis, disons que chaque SBC ne peut exploiter qu'une seule bande par système d'antennes. Il s'avère que ce choix d'un double système d'antennes, apporte l'agilité, la flexibilité, et l'efficacité nécessaires à l'accomplissement de fonction migratoire, en particulier, et à la capacité des SBCs à jouer pleinement les rôles qui leur sont dévolues, en général. A notre connaissance, cette notion de migration d'une bande de spectre à une autre n'a pas été considérée de cette manière, dans les travaux traitant cette question. L'usage, dans ces travaux et de considérer une large bande de spectre et d'appliquer différentes solutions pour capter, notifier, et exploiter les trous spectraux qui y apparaîtraient (ce que nous appelons OSRs). L'hypothèse faite par ces travaux, nous semble-t-il, est que la bande de travail pourra toujours fournir des trous spectraux pour soutenir les communications opportunistes. Nous pensons que cette hypothèse ne résisterait pas à une implémentation d'un RRC(s) réel(s). En effet, sans coopération entre les différents réseaux cognitifs la bande de spectre deviendra très vite surchargée ; en fait, même avec l'existence d'une coopération la congestion est possible, et il faudra chercher une nouvelle bande de spectre pour supporter les communications opportunistes. Ceci nous ramène à la question de la migration des communications dans les RRCs.

Nous proposons, dans notre solution, d'installer des micro-serveurs de bord (MSBs ou edge micro-servers) au niveau des réseaux d'accès radio (RAR) des réseaux primaires composant le RSFH (plus précisément au niveau des contrôleurs de stations de base, CSBs, ou des contrôleurs du réseau radio, CRRs). Cette solution s'inspire du paradigme "Edge Computing" qui préconise le déplacement des infrastructures de calcul (et donc des services eux-mêmes) à proximité des utilisateurs finaux, au lieu de les éloigner derrière des infrastructures lourdes des réseaux cœurs. Le rôle de ces MSBs est (entre autre) de répondre aux questions suivantes :

- i. Comment reconnaître que la bande de départ risque de ne plus être propice au support de toutes les communications actuelles entre la SBC et ses USs et qu'il faille donc trouver une autre bande pour y faire migrer ces communications ?
- ii. Une fois la migration décidée, comment est choisie la bande destination, et est-ce que la migration doit être provisoire ou définitive ?
- iii. Lorsque la migration est déclenchée, qui va instruire les UPs de la bande de destination de commencer, à leur tour, la notification des OSRs dans cette bande ? De même, lorsque la migration se termine, qui va instruire les UPs de la bande de départ d'arrêter la notification des OSRs dans cette bande pour le compte de l'actuelle SBC ?

Les MSBs, maintiennent des liens avec les SBCs (via les réseaux cœur) d'une part, et avec les PUs (via les RAR) d'autre part. Les liens avec les SBCs servent, entre autres choses, à envoyer des rapports périodiques sur l'état des conditions radio qui règnent dans les cellules couvertes par les SBPs, la qualité des communications, le nombre d'utilisateurs...etc. Ces rapports seront exploités par I-CRICNet pour répondre aux deux premières questions posées ci-dessus. Les liens avec les PUs servent à établir des canaux de contrôle pour la collecte d'informations (détenues ou obtenues par les PUs) et l'envoi de commandes (à ces mêmes PUs pour les instruire d'effectuer différentes actions ayant trait au fonctionnement global de I-CRICNet). En particulier, ces liens permettent de répondre à la troisième question posée.

A ce stade de notre exposé, les éléments d'information accumulés nous force à revisiter la question des schémas de protocoles de notification (des OSRs), auxquels doivent se conformer les différents acteurs impliqués. En effet, l'introduction de la fonction migratoire, associée aux SBCs à double système d'antennes, fait apparaître de nouvelles situations, appelant des modes de fonctionnement appropriés (des schémas de notification). La raison derrière cette diversité est quadruple ; d'abord, les deux systèmes d'antennes peuvent exploiter une même bande ou deux bandes différentes (mode-réunies/séparées) ; ensuite, les USs peuvent constituer une seul groupe ou deux groupes différents (groupés/divisés) ; de même, les OSRs peuvent apparaître dans l'une (ou l'autre) des bandes associées aux deux antennes ; enfin, chaque système d'antenne peut se trouver dans l'un des deux modes de communication possibles (mode-T<sub>x</sub> ou mode-R<sub>x</sub>). Les schémas de notification devraient, rappelons-le, permettre à tous les partenaires communicants d'être au courant de l'état des OSRs dans la (ou les) BOA(s), à tout moment. Nous revisitons un seul des scénarios sus présentés, à savoir, le quatrième scénario ; qui correspond peut-être au cas le plus complexe. Outre la difficulté inhérente à la TAR elle-même (OFDM), il faut également tenir compte des différents modes de fonctionnement de la SBC. Pour ce scénario, nous présentons les schémas correspondants aux cinq situations suivantes :

- i. SBC en mode-réunies&groupés, avec respectivement, apparition et extinction d'une OSR.
- ii. SBC en mode-séparées&divisés, avec, respectivement, apparition et extinction d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en réception.
- iii. SBC en mode-séparées&divisés avec, respectivement, apparition et extinction d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en émission.
- iv. SBC en mode-séparées&groupés, avec, respectivement, apparition et extinction d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en réception.
- v. SBC en mode-séparées&groupés avec, respectivement, apparition et extinction d'une OSR dans la cellule primaire correspondant à l'antenne en émission.

Nous mettons en valeur l'aspect générique de notre schéma de départ, en présentant, pour chaque situation, les interactions qui ont lieu entre les acteurs impliqués, faisant ressortir la flexibilité et l'adaptabilité dont il fait preuve face à cette diversité (de situations). A cette occasion, une autre question est soulevée pointant l'impact de cette genericité sur la complexité des rôles individuels joués par chacun des acteurs (SBCs, USs, et PUs). En effet, dans notre proposition, un schéma générique est nécessaire, encore faut-il qu'il soit réalisable à coût acceptable. Nous y répondons, en établissant et commentant les diagrammes d'activité de chacun des intervenants. En plus de la vue synthétique que ces diagrammes nous permettent de donner (vue qui atteste de l'aspect faisabilité), ils nous aident à apprécier la complexité attendue, à travers le nombre et la structure des états/transitions caractérisant ces diagrammes.

Il a été déjà mentionné que dans notre proposition la BOC est toujours exploitée avec la technologie d'accès NC-OFDM, quelle que soit la TAR de la bande (sous licence) courante. En d'autres termes, la BOC est considérée, au niveau de la SBC, comme étant divisée, dans le domaine fréquentiel, en un nombre paramétrique de sous-porteuses et structurée, dans le domaine temporel, en trames de durées paramétriques aussi. La question clé que se pose est, alors, de savoir comment détecter les OSRs dans la BOC (c.à.d. les trous spectraux). Nous proposons un schéma de détection qui sert à présenter une manière d'arriver au but, et montrer ainsi la faisabilité de ce que nous avançons. Nous adoptons, le modèle de canal à deux interrupteurs (two-switch channel model) pour modéliser l'état des sous-canaux, dans les sous-bandes d'un système RC basé sur la technologie NC-OFDM. Dans ce modèle, l'interrupteur est ouvert lorsqu'un UP est détecté dans le sous-canal, et fermé sinon. L'objectif du schéma de détection est synchroniser les interrupteurs situés du côté de la source avec ceux du côté de la destination. L'information relative aux interrupteurs fermés est véhiculée à travers une séquence de symboles d'entraînement prédéfinis. Dans le récepteur de la destination, la détection des sous-canaux libres (sous-porteuses) est dérivée à partir des probabilités à posteriori (PAPs) des sous-canaux libres, sur la base des symboles d'entraînement reçus et des probabilités de détection et de fausse alarme des SCCs.

L'apport de la détection coopérative en termes d'amélioration des performances, du fait de sa résilience à l'évanouissement par trajets multiples (multipath fading), est un fait établi. Dans la détection de spectre coopérative, la décision finale quant à la présence (ou non) d'un trou spectral résulte de la prise en compte de plusieurs décisions (ou rapports) locales, indépendantes. La perspective d'un gain de performances nous a décidés à envisager la coopération dans notre schéma de détection, déjà présenté. Derrière cette décision, il y avait aussi le besoin de connaître dans quelle

mesure notre schéma était-il adaptable à l'ajout d'un niveau de coopération, sans qu'il soit lui-même remis en cause. Assurément, les stratégies de coopérations proposées dans la littérature ne sont pas faites pour fonctionner, telles quelles, dans un contexte tel que le nôtre, bien qu'elles soient d'un intérêt certain. Ce constat nous a conduits à essayer une extension souple de notre schéma, qui s'inspire de ces stratégies, pour introduire la coopération en tant qu'option.

Dans un schéma de détection coopérative classique, chaque US effectue de manière indépendante sa propre détection locale c.à.d. essaye de capter la présence d'un UP par lui-même, pour ensuite partager sa décision locale avec un centre de fusion (CF) qui prendra la décision globale. Le CF combine les décisions locales collectées en utilisant une règle de fusion, telle que OU, ET, ou la règle de la Majorité. Des stratégies alternatives ont été proposées, qui consistent à réduire le nombre de USs autorisés à participer à la coopération. D'autres stratégies de détection coopératives sélectives ont poussé la sélection à l'extrême en ne laissant qu'un US au plus envoyer sa décision locale au CF ; c'est les stratégies de détection coopératives sélectives supérieures (DCSS).

Pour introduire, de manière souple, la DCSS dans I-CRICNet, nous gardons le schéma de détection original auquel nous ajoutons la coopération, comme option. Dans ce schéma étendu, c'est à la SBC que revient la décision de recourir à la coopération (ou non), à chaque fois qu'une OSR est signalée. Une fois encore, nous constatons que les schémas de notification et de détection d'accommodent assez correctement aux nouvelles exigences, sans remise en cause de leur principe ni de leur outils. En effet, les schémas considérés dans les différentes situations (mode-réunies&groupés, mode-séparées&divisés, mode-séparées&groupés), ont intégrés la coopération de manière souple, tant au niveau des interactions entre acteurs qu'au niveau des rôles de chacun d'eux. Cela est illustré à travers les diagrammes des séquences et les diagrammes d'activités que nous avons mis à jour pour l'occasion.

L'évaluation du schéma proposé est faite en rapport avec différents paramètres et par rapport à deux schémas existants, à savoir le schéma de détection dont nous nous sommes inspirés et le schéma basé sur la détection d'énergie. Les paramètres choisis sont en relation avec les facteurs à impact sur les performances, en termes de taux d'erreur moyen (TEM). Aussi, avons-nous choisis d'examiner l'impact des conditions radio et de leurs variations, de la probabilité de fausse détection, du nombre de symboles des séquences d'entraînement, et des interférences causées par un utilisateur primaire unique vs plusieurs utilisateurs primaires.

Nous avons aussi étudié les performances du schéma de détection coopératif. L'étude comprend la formulation de la *probabilité de détection*, de la *fausse alarme*, du *débit moyen*, et de la *consommation d'énergie*.

En termes des dispositions qui devraient être prises pour ne pas causer d'interférence induite, aux UPs, ou du moins de la maintenir à un niveau acceptable, dans le cadre du réseau I-CRICNet, nous avons mené une analyse des interférences (au niveau d'une SBP donnée) causées dans les canaux utilisés pour les communications opportunistes. Cette analyse, permet à la SBC d'une part de mettre en place un mécanisme de contrôle des puissances de transmission dans ces canaux et d'autre part de reconnaître la nécessité de déclencher la migration vers une autre BOA, lorsque les interférences deviennent importantes et/ou durent assez longtemps. Ces deux mesures (avec d'autres dispositions) peuvent permettre d'atténuer les nuisances que peuvent subir les communications primaires du fait des communications opportunistes. Les formulations obtenues recourent à un modèle, largement accepté, qui caractérise la distribution spatiale des nœuds dans un réseau sans fil, à savoir le processus ponctuel de Poisson (Poisson Point Process, PPP).

Nos travaux futurs porteront sur des questions importantes qui reposent sur (ou complètent) le système de récolte proposé et qui l'étendent à d'autres contextes sans-fil. L'une de ces questions est la détection des RSOs dans d'autres contextes sans-fil, comme les systèmes CDMA ou WiFi. Une autre question est liée à l'adaptation des protocoles génériques présentés, pour sous-tendre la signalisation et la détection des RSOs dans ces divers contextes sans fil. La troisième grande question est la conception de mécanismes pour une commutation agiles et en temps opportun entre les divers réseaux sans fil hétérogènes, tant pour les CBS que pour les SU. Bien entendu, ces questions s'ajoutent à celles qui concernent le contrôle d'accès au réseau et les mécanismes de "handover" nécessaires.

## REFERENCES

- [1] N. Zhang, H. Zhou, K. Zheng et al., “Cooperative Heterogeneous Framework for Spectrum Harvesting in Cognitive Cellular Network,” *IEEE Communication Magazine*, pp. 60-67, May 2015.
- [2] M. Matinmikko, H. Okkonen, M. Palola et al., “Spectrum Sharing Using Licensed Shared Access: The Concept and its Workflow for LTE-ADVANCED Networks,” *IEEE Wireless Communications*, pp. 72-79, April 2014.
- [3] S. Andreev, M. Gerasimenko, O. Galinina et al., “Intelligent Access Network Selection in Converged Multi-Radio Heterogeneous Networks,” *IEEE Wireless Magazine*, pp. 86-96, December 2014.
- [4] N. Bhushan, J. Li, D. Malladi, R. Glimore, D. Brenner et al., “Network Densification: The Dominant Theme for Wireless Evolution into 5G,” *IEEE Wireless Communications*, pp. 82-89, February 2014.
- [5] A. Ghosh et al., “Heterogeneous Cellular Networks : From Theory to Practice,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, n° 16, pp. 54-64, 2012.
- [6] R. H. Tehrani, S. Vahid, D. Triantafyllopoulou et al., “Licensed Spectrum Sharing Schemes for Mobile Operators: A Survey and Outlook,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, pp. 1-33, 2016.
- [7] A. A. Khan et al., “Cognitive Radio for Smart Grids: Survey of Architectures, Spectrum Sensing Mechanisms, and Networking Protocols,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, n° 11, pp. 860-898, 2016.
- [8] J. Zhu et al., “Cognitive Network Cooperation for Green Cellular Networks,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 849-857, 2016.
- [9] F. Hu, B. Chen et K. Zhu, “Full Spectrum sharing in Cognitive Radio Networks Toward 5G: A Survey,” *IEEEAccess*, vol. 6, pp. 15754-15776, 2018.
- [10] X. Xing, T. Jing, W. Cheng, Y. Huo et X. Cheng, “Spectrum Prediction in Cognitive Radio Networks,” *IEEE Wireless Communications*, pp. 90-95, 2013.
- [11] V. Stavroulaki et e. al., “Cognitive Control Channel: From concept to Identification of implementation Options,” *IEEE Communication Magazine*, vol. 50, n° 17, pp. 96-108, 2012.
- [12] K. Thilina, G. Madushan, E. Hossain et D. I. Kim, “DCCC-MAC: A Dynamic Common Control Channel-Based MAC Protocol for Cellular Cognitive Radio Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, n° 15, pp. 3597 - 3613, 2016.
- [13] O. Sallent et al., “Cognitive Pilot Channel Enabling Spectrum Awareness,” chez *IEEE International Conference on Communications Workshops*, Dresden, Germany, 2009.
- [14] O. Sallent et al., “Cognitive Pilot Channel: A Radio Enabler for Spectrum Awareness and optimized Radio Resource Management,” chez *ICT Mobile Summit*, Santander, 2009.
- [15] W. Liang, S. X. Ng et L. Hanzo, “Cooperative Overlay Spectrum Access in Cognitive Radio Networks,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, n° 13, pp. 1924-1944, 2017.

- [16] J. Kim, D. Le et e. W. Sung, “Interference coordination of heterogeneous LTE systems using remote radio heads,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, n° 130, 2013.
- [17] A. Jeffrey G, “Seven Ways that HetNets Are a Cellular Paradigm Shift,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, n° 13, pp. 136-144, 2013.
- [18] D. Lee, H. Seo et al., “Coordinated Multipoint Transmission and Reception in LTE-Advanced: Deployment Scenarios and Operational Challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, n° 12, pp. 148-155, 2012.
- [19] B. Soret, K. I. Pedersen, N. T. K. Jorgensen et V. Fernandez-Lopez, “Interference Coordination for Dense Wireless Networks,” *IEEE Communications Magazine*, pp. 102-108, 2015.
- [20] D. Zhan, R. Shinkuma et al., “Bandwidth Exchange: An Energy Conservative Incentive Mechanism for Cooperation,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, n° 16, pp. 2055-2065, 2010.
- [21] M. H. Sonal Jain, “Improving Capacity in Wireless Heterogeneous Networks by Mitigation of Interference,” chez 7th International Conference on Advances in Computing & Communications, ICACC, Cochin, India, 2017.
- [22] Y. Teng, Y. Wang et K. Horneman, “Co-primary spectrum sharing for denser networks in local area,” chez 9th Int. Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2014.
- [23] R. C. Dwarakanath, J. D. Naranjo et A. Ravanshid, “Modeling of interference maps for Licensed Shared Access in LTE-advanced networks supporting Carrier Aggregation,” chez Wireless Days (WD), Valencia, 2013.
- [24] J. Mitola, “Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications,” *Mobile Networks and Applications*, n° 16, pp. 435-441, 2001.
- [25] J. J. Mitola III and G.Q. Maguire, “Cognitive Radio :Making Software Radios More Personal,” *IEEE Personal Communications*, pp. 13-18, August. 1999.
- [26] S. Haykin, “Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, n° 12, pp. 201-220, 2005.
- [27] R. Kaur. e. al., “Spectrum Sharing Schemes in Cognitive Radio Network: A Survey,” chez Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, 2018.
- [28] K. Ashton, “That Internet Of Things,” *RFiD journal*, vol. 22, n° 17, pp. 97-114, 2009.
- [29] M. Naidja et A. Bilami, “A dynamic self-organising heterogeneous routing protocol for clustered WSNs,” *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, vol. 12, n° 12, 2017.
- [30] F. Paisana et al., “Radar, TV and Cellular Bands: Which Spectrum Access Techniques for Which Bands?,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, n° 13, pp. 1193-1220, 2014.
- [31] L. Gao, Xinbing, Wang et al., “Spectrum Trading in Cognitive Radio Networks: A Contract-Theoretic Modeling Approach,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 29, n° 14, pp. 843-855, 2011.

- [32] M. Sherman, A. N. Mody, R. Martinez, C. Rodriguez et R. Reddy, “IEEE Standards Supporting Cognitive Radio and Networks, Dynamic Spectrum Access, and Coexistence,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, n° 17, pp. 72-79, July 2008.
- [33] IEEE P802.22 Working Group, *IEEE Std 802.22™-2011 Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, New York: IEEE Computer Society, 2011.
- [34] 802.19 Working Group, *IEEE Std 802.19.1™-2014 Part 19: TV White Space Coexistence Methods*, New York: IEEE Computer Society, 2014.
- [35] Standard ECMA-392, *MAC and PHY for Operation in TV White Space*, Geneva: Ecma International, 2012.
- [36] A. Theodoros et al., “Guest Editorial Spectrum sharing and Aggregation for Future Wireless Networks, Part I,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, n° 110, pp. 2533-2536, 2016.
- [37] C. S. Park, L. Sundstrom et al., “Carrier Aggregation for LTE-Advanced: Design Challenges of Terminals,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, n° 112, pp. 76-84, 2013.
- [38] R. Zhan, Z. Zhen et al., “Equivalent Capacity in Carrier Aggregation-Based LTE-A Systems: A Probabilistic Analysis,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, n° 111, pp. 6444-6460, 2014.
- [39] A. Mukherjee et al., “Licensed-Assisted Access LTE: Coexistence with IEEE 802.11 and the Evolution toward 5G,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, n° 16, pp. 50-57, 2016.
- [40] R. Zhang, M. Wang et al., “LTE-UNLICENSED: The Future of Spectrum Aggregation for Cellular Networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, n° 13, pp. 150-159, 2015.
- [41] Y. Mekonnen, M. Haque et al., “LTE and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Spectrum with Application to Smart Grid: A Review,” *chez IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, Denver, CO, USA, 2018.
- [42] Qualcomm, *Qualcomm Research LTE in Unlicensed Spectrum: Harmonious Coexistence with WiFi*, Qualcomm, 2014.
- [43] T. Nihtilä, V. Tykhomyrov et al., “System Performance of LTE and IEEE 802.11 Coexisting on a Shared Frequency Band,” *chez Proc. IEEE WCNC*, 2013.
- [44] N. Guvenc, Rupasinghe et al., “Licensed-assisted access for WiFi-LTE coexistence in the unlicensed spectrum,” *chez IEEE GLOBECOM Workshop*, 2014.
- [45] L. Li, A. H. Jafari, X. Chu et J. Zhang, “Simultaneous transmission opportunities for LTE-LAA smallcells coexisting with WiFi in unlicensed spectrum,” *chez IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, 2016.
- [46] A. Mohmood et al., “A review of wireless communications for smart grid,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 248-260, 2015.
- [47] B. Ren, M. Wang, J. Zhang, W. Yang, J. Zou, M. Hua et X. You, “Cellular Communications on Licensed-Exempt Spectrum,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, n° 15, pp. 146-153, 2016.

- [48] K. Bian et J.-M. J. Park, Handbook of Cognitive Radio, Chapter 35, Singapore: Springer Nature, 2019.
- [49] M. Jo et al., “A Survey of Converging Solutions for Heterogeneous Mobile Networks,” IEEE Wireless Communications, vol. 21, n° 16, pp. 54-62, 2014.
- [50] K. K. Yap, T. Y. Huang, M. Kobayashi, Y. Yiakoumis et al., “Making Use of All the Networks Around Us: A Case Study in Android,” chez Proceedings of the ACM SIGCOMM CellNet workshop, 2012.
- [51] T. De Schepper et al., “ORCHESTRA: Enabling Inter-Technology Network Management in Heterogeneous Wireless Networks,” IEEE Transactions on Network and Service Management, vol. 15, n° 14, pp. 1733 - 1746, 2018.
- [52] Q. Wu et al., “A Cloud-Based Architecture for the Internet of Spectrum Devices Over Future Wireless Networks,” IEEE Access, vol. 4, pp. 2854-2862, 2016.
- [53] S. Haykin, P. Setoodeh et al., “Cognitive Dynamic System as the Brain of Complex Networks,” IEEE Journal of Selected Areas in Communications, vol. 34, n° 110, pp. 2791-2800, 2016.
- [54] T. Jiang et al., “Energy-Efficient NC-OFDM/OQAM-Based Cognitive Radio Networks,” IEEE Communications Magazine, pp. 54-60, JULY 2014.
- [55] P.D. Diamantoulakis et al., “Carrier Aggregation for Cooperative Cognitive Radio Networks,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 66, n° 107, pp. 5904-5918, JULY 2017.
- [56] S. Gourdache, A. Bilami et B. K., “A framework for spectrum harvesting in heterogeneous wireless networks integration,” Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, vol. 33, n° 13, pp. 281-290, 2021.
- [57] E. Magistretti, O. Gurewitz et E. W. Knightly, “802.11 ec: Collision Avoidance Without Control Messages,” IEEE Transactions on Networking, vol. 22, n° 16, pp. 1845-1858, Dec 2014.
- [58] D. Qu, J. Ding, T. Jiang et X. Sun, “Detection of Non-Contiguous OFDM Symbols for Cognitive Radio Systems without Out-of-Band Spectrum Synchronization,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 10, n° 102, pp. 693-701, 2011.
- [59] Y. Tawk et al., Antenna Design for Cognitive Radio, Norwood: ARTECH HOUSE, 2016.
- [60] S. Gandhi et al., A Survey on Planar Antenna Designs for Cognitive Radio Applications, Springer Science & Business Media, 2017.
- [61] P. S. Khodashenas et al., “Reconfigurable Radios: A Possible Solution to Reduce Entry Costs in Wireless Phones,” Proceedings of the IEEE, vol. 103, n° 13, pp. 438-451, 2017.
- [62] A. C. Baktir, A. Ozgovde et al., “How Can Edge Computing Benefit From Software-Defined Networking: A Survey, Use Cases, and Future Directions,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, n° 14, pp. 2359-2391, 2017.
- [63] G. Boracchi et al., “The Role of Virtualization in the Small Cell Enabled Mobile Edge Computing Ecosystem,” Communications in Computer and Information Science, vol. 74, pp. 728-733, 2017.

- [64] M. T. Beck, M. Werner, S. Feld et T. Schimper, “Mobile Edge Computing : A Taxonomy,” chez 6th International Conference on Advances in Future Internet (AFIN 2014), 48-54, 2014.
- [65] Y. Liao et al., Listen And Talk Full-duplex Cognitive Radio Networks, Switzerland: Springer, 2016.
- [66] Y. Liao, L. Song, Z. Han et Y. Li, “Full Duplex cognitive Radio: A New Design Paradigm for Enhancing spectrum Usage,” IEEE Communications Magazine, vol. 53, n° 15, pp. 138-144, May 2015.
- [67] P. Malarvizhi, Vijayakumar et S, “Wide Band Full Duplex Spectrum Sensing with Self-Interference Cancellation–An Efficient SDR Implementation,” Mobile Networks Applications, 2017.
- [68] Z. Long, D. Jian et L. Keping, “Selective-Reporting Based Cooperative Spectrum Sensing Strategies for Cognitive Radio Networks,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, n° 17, pp. 3043-3055, 2013.
- [69] L. Lu, X. Zhou, U. Onunkwo et G. Y. Li, “Ten years of research in spectrum sensing and sharing in cognitive radio,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012.
- [70] A. Bagwari et B. Singh, “Comparative performance evaluation of Spectrum sensing techniques for Cognitive Radio Networks,” chez Fourth International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, 2012.
- [71] L. D. Vito, “Methods and technologies for wideband spectrum sensing,” Measurement, n° 146, pp. 3153-3165, 2013.
- [72] S. Gourdache, A. Bilami et K. Barka, “Spectrum harvesting for heterogeneous wireless networks integration,” Wireless Networks, vol. 26, pp. 431- 447, 2020.
- [73] L. Li, D. Qu, T. Jiang et J. Ding, “Design of LDPC codes for Non-Contiguous OFDM-Based Communication Systems,” 2012.
- [74] E. Dahlman, S. Parkvall et J. Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, Oxford: Elsevier, 2011.
- [75] H. Sun et al., “Cooperative Wideband Spectrum Sensing Over Fading Channels,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, n° 13, pp. 1382-1394, 2015.
- [76] R. Kishore, R. C.K. et S. Gurugopinath, “Performance Analysis of Superior Selective Reporting-based Energy Efficient Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks,” Ad Hoc Networks, 2017.
- [77] S. Atapattu, C. Tellambura et H. Jiang, “Energy Detection Based Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 10, n° 14, pp. 1232-1241, 2011.
- [78] J. G. Proakis, M. Salehi et G. Bauch, Contemporary Communication Systems Using MATLAB, Stamford: Cengage Learning, 2004.
- [79] D. Qu, J. Ding, T. Jiang et X. Sun, “Detection of Non-Contiguous OFDM Symbols for Cognitive Radio Systems without Out-of-Band Spectrum Synchronization,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 10, n° 102, pp. 693-701, 2011.

- [80] Al-Tamimi, C. So-In et Karim, Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), Auerbach Publications, CRC Press, 2010.
- [81] B. A, “Spatial Point Processes and their Applications,” Weil W., Berlin, 2007.
- [82] S. Kusaladharna, P. Herath et C. Tellambura, “Impact of transmit Power Control on Aggregate Interference in Underlay Cognitive Radio Networks,” IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 1567-1572, 2014.
- [83] A. Zanella, E. Salbaroli et al., “Interference Analysis in Poisson Field of Nodes of Finite Area,” IEEE Transaction On Vehicular Technology, vol. 58, n° 14, pp. 1776-1783, 2009.