

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
HOUARI BOUMEDIENNE  
FACULTÉ D'ÉLECTRONIQUE ET D'INFORMATIQUE



## Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

En : INFORMATIQUE  
Option : Informatique Mobile

par : **Ahmed ALIOUA**

Sujet

**Modélisation et évaluation des performances des stratégies de contrôle d'admission avec rappel et canaux gardiens dans les réseaux mobiles cellulaires**

Soutenue publiquement, le 13/05/2014 devant le jury composé de :

M	Amar AISSANI	Professeur à l'USTHB	Président
Mme	Nawel GHARBI	Maître de conférences A, à l'USTHB	Directrice de mémoire
M	Mohand Cherif BOUKALA	Maître de conférences A, à l'USTHB	Examineur
M	Mohamed Amine RIAHLA	Maître de conférences B, à l'UMBB	Invité



# *Remerciements*

*Je remercie DIEU le Tout Puissant pour son aide.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à Madame le Docteur Nawel GHARBI BOUHAL, ma directrice de mémoire, pour m'avoir accueilli et avoir accepté de diriger ce mémoire et d'encadrer mes travaux pendant tout ce temps. Sa compétence, ses conseils, ses encouragements, sa patience, sa compréhension, ses suggestions pertinentes et ses idées fructueuses m'ont permis de bien mener ce travail.*

*Je souhaite aussi exprimer ma gratitude à Mr le Professeur Amar AISSANI pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de ma soutenance. Mes remerciements vont aussi au Docteur Mohand Cherif BOUKALA et le Docteur Mohamed Amine RIAHLA pour avoir accepté de juger mon travail.*

*J'adresse aussi ma profonde reconnaissance à tous mes enseignants, sans exception, qui ont veillé à ma formation.*

*Merci à tous les membres de ma famille qui m'ont accompagné tout au long de mes études, voir de ma vie, par leur amour inconditionnel et leur soutien absolu.*

*Je n'oublie pas d'adresser mes vifs remerciements à tous mes amis, et à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont aidé à l'aboutissement de ce modeste travail.*

*À mes chers parents  
À tous mes frères  
À mes sœurs  
À Amina*

# Résumé

Dans les réseaux mobiles cellulaires, et plus particulièrement dans les réseaux mobiles à petites cellules (*Small Cell Networks : SCNs*), la procédure de handover est très fréquente et a un impact significatif sur les performances du réseau. En effet, la terminaison forcée de l'appel est un phénomène très gênant pour l'abonné. Ainsi, implanter des mécanismes de contrôle d'admission des appels (*CAC : Call Admission Control*) permettant de réduire la probabilité de coupure de la communication devient très important. Ces mécanismes suggèrent la favorisation des appels de handovers par rapport aux nouveaux appels via différentes techniques et plus souvent via la technique des canaux gardiens. Cette dernière consiste à réserver un nombre de canaux parmi la totalité des canaux disponibles dans chaque cellule exclusivement pour les appels de handovers. D'autre part, les réseaux mobiles cellulaires sont généralement caractérisés par le phénomène des appels répétés (rappel). Qui a une forte influence sur les performances du réseau.

Dans la même optique, nous nous intéressons dans ce mémoire à la modélisation des stratégies de *CAC* ainsi qu'à l'étude de l'impact de l'utilisation des canaux gardiens sur les performances des réseaux mobiles *SCNs*, où la taille de la population des abonnés est considérée *finie*, tout en prenant en compte le phénomène des appels répétés. Pour cela, notre étude se basera essentiellement sur le formalisme des réseaux de Petri stochastiques généralisés (*RDPSG*) et celui des chaînes de Markov à temps continu (*CMTC*).

Dans un premier temps, nous proposons un mécanisme de *CAC* avec rappel des nouveaux appels bloqués, une population d'abonnés finie et  $g$  canaux gardiens que nous modélisons à l'aide du formalisme de *CMTC* puis à l'aide des *RDPSG*. Nous proposons dans ce cadre, pour le calcul des probabilités d'états, une généralisation de l'algorithme de *Tran-Gia* et *Mandjes* [1], à un nombre quelconque de canaux gardiens. Les résultats ont montré que l'utilisation de la technique des canaux gardiens peut garantir une faible probabilité de blocage des appels de handovers, mais engendre souvent une augmentation de la probabilité de blocage des nouveaux appels et une perte du trafic offert.

Partant de ce constat et dans le but de maximiser l'utilisation des canaux, nous proposons une nouvelle stratégie de *CAC* avec rappel des nouveaux appels et rappel des appels de handovers, canaux gardiens *empruntables* et une *priorité* pour les nouveaux appels bloqués intitulé *Priority for Fresh call Retrial based on Guard Channel Borrowing Scheme (PFR-GCBS)*, à l'aide des *RDPSG*. La principale nouveauté apportée par *PFR-GCBS* c'est la priorité attribuée aux rappels des nouveaux appels bloqués via le nouveau concept dit d'*emprunt de canaux gardiens*. Ce concept, autorise un rappel d'un nouvel appel bloqué à emprunter et occuper un canal gardien oisif, ce mécanisme améliore la *QoS* du réseau et utilise les ressources disponibles de la micro-cellule d'une manière plus efficace.

**Mots clés :** Réseaux mobiles micro-cellulaires, Contrôle d'admission des appels, Phénomène de rappels, Canaux gardiens, Modélisation, Paramètres de performance, Réseaux de Petri stochastiques généralisés, Chaînes de Markov à temps continu.

# Abstract

In cellular mobile networks, especially in *Small Cell Networks (SCNs)*, the procedure of handover is very frequent and has a significant impact on network performance. Indeed, dropping a call in progress is more annoying than blocking a fresh call request for subscribers. Thus, implement mechanisms of call admission control (*CAC*) to reduce the blocking probability of communication becomes very important. These mechanisms suggest the favorisation of handovers calls over fresh calls via different techniques and often through the technique of guard channels. This consists in reserving a number of channels among the totality of channels available in each cell exclusively for handovers calls. On the other hand, cellular mobile networks are generally characterized by the phenomenon of repeated calls (retrial). Which has a strong influence on the network performance.

In same optics, we are interested in this thesis on the modeling of *CAC* strategies and the study of the impact of guard channels on the *SCNs* networks performances, where the size of subscriber's population is considered finite, while taking into account the phenomenon of repeated calls. Therefore, our study will be based essentially on the formalism of generalized stochastic Petri nets (*GSPNs*) and that of Markov chains.

In a first time, we propose a mechanism of *CAC* with retrial of fresh blocked calls, finite subscriber's population and  $g$  guard channels, using the formalism of continuous Markov chains then using that of *GSPN*. Thereafter, and for calculation of steady state probabilities, we propose to use a generalization of algorithm of *Tran-Gia* and *Mandjes* [1] to unspecified number of guard channels. The results showed that the use of guard channels scheme can significantly decrease the blocking probability of handovers calls, however, generally increase the blocking probability of fresh calls and cause loss in offered traffic.

On this basis and in order to maximize the use of channels, we propose a new strategy of *CAC* with retrial of both of fresh blocked calls and handovers blocked calls, borrowing of guard channels and a priority for fresh blocked calls retrial, called : Priority for Fresh call Retrial based on Guard Channel Borrowing Scheme (*PFR-GCBS*), using the formalism of *GSPN*. The principal novelty provided by *PFR-GCBS* is the priority assigned to the fresh blocked calls retrials via the new concept of guard channels borrowing. This concept authorizes a repeated call of a fresh blocked call to borrow and occupied an idle guard channel. *PFR-GCBS* improves the *QoS* of the system and uses the available resources of the micro-cell more efficiently.

**Mots clés :** Small Cell wireless Networks, Call Admission Control, Retrial phenomenon, Guard Channel, Modeling, Performance Parameters, Generalized Stochastic Petri Nets, Markov Chains.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Table des Matières</b>	<b>i</b>
<b>Table des figures</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>v</b>
<b>1 Généralités sur les réseaux mobiles cellulaires.</b>	<b>4</b>
1.1 Introduction . . . . .	4
1.2 Les environnements mobiles et les réseaux sans fil . . . . .	5
1.2.1 Classes des réseaux mobiles sans fil . . . . .	5
1.3 Les réseaux mobiles cellulaires . . . . .	6
1.3.1 Architecture générale d'un réseau mobile cellulaire . . . . .	6
1.3.2 Notions de bases . . . . .	7
1.3.2.1 Le concept cellulaire . . . . .	7
1.3.2.2 Modélisation d'une cellule . . . . .	7
1.3.2.3 Taille de la cellule . . . . .	8
1.3.2.4 La réutilisation des fréquences et le concept de motif . . . . .	8
1.3.2.5 Les méthodes de base d'accès au support radio . . . . .	9
1.4 Évolution des réseaux mobiles cellulaires . . . . .	10
1.4.1 La première génération (1G) . . . . .	10
1.4.2 La deuxième Génération (2G) . . . . .	10
1.4.2.1 Réseau GSM . . . . .	11
1.4.2.2 La 2,5 G : Le GPRS . . . . .	14
1.4.2.3 La 2,75 G : EDGE . . . . .	14
1.4.3 La troisième Génération (3G) . . . . .	14
1.4.3.1 UMTS . . . . .	15
1.4.3.2 La 3,5 : HSDPA . . . . .	17
1.4.3.3 La 3,75 G : HSUPA . . . . .	18
1.4.4 La quatrième génération (4G) . . . . .	18
1.4.4.1 LTE . . . . .	18
1.4.5 Comparaison des différentes générations . . . . .	19
1.5 Small Cell Wireless Networks (SCNs) . . . . .	19
1.6 La gestion de la mobilité dans les réseaux mobiles cellulaires . . . . .	20
1.6.1 La gestion de l'itinérance (roaming) . . . . .	20
1.6.2 La gestion du transfert inter-cellulaire (handover) . . . . .	20

1.7	Le transfert inter-cellulaire : handover . . . . .	20
1.7.1	Nécessité du handover . . . . .	21
1.7.2	Phases du handover . . . . .	21
1.7.3	Classification du handover . . . . .	22
1.7.3.1	Classification selon le mode du transfert de lien . . . . .	22
1.7.3.2	Classification selon le type de la technologie sans fil . . . . .	23
1.7.3.3	Classification selon la portée de la mobilité : . . . . .	23
1.7.3.4	Classification selon les couches du modèle OSI : . . . . .	23
1.7.3.5	Classification selon le niveau de contrôle du handover . . . . .	24
1.7.4	Les mesures de performance de la procédure de handover . . . . .	24
1.8	Schémas d'allocation de canaux . . . . .	24
1.9	Conclusion . . . . .	25
<b>2</b>	<b>Les réseaux de Petri stochastiques généralisés (RDPSG).</b>	<b>26</b>
2.1	Introduction . . . . .	26
2.2	Les concepts de bases de réseaux de Petri (RDP) . . . . .	27
2.2.1	Définition informelle . . . . .	27
2.2.2	Définition formelle . . . . .	28
2.2.2.1	Définition d'un réseau de Petri . . . . .	28
2.2.2.2	Définition d'un réseau de Petri marqué [46], [47] . . . . .	28
2.2.3	Représentation d'un RDP . . . . .	29
2.2.3.1	Représentation graphique . . . . .	29
2.2.4	Représentation matricielle . . . . .	29
2.2.5	Évolution d'un réseau de Petri . . . . .	30
2.2.5.1	Règle de Franchissement . . . . .	30
2.2.5.2	Séquence de franchissement [51] . . . . .	30
2.2.5.3	Marquage accessible [46] . . . . .	30
2.2.5.4	L'ensemble d'accessibilité . . . . .	31
2.2.5.5	Graphe d'accessibilité [46] . . . . .	31
2.2.6	Concurrence et conflit entre transitions . . . . .	31
2.2.6.1	Transitions concurrentes (parallélisme) [52], [53] . . . . .	31
2.2.6.2	Conflit entre transitions . . . . .	31
2.2.7	Principales propriétés usuelles des réseaux de Petri . . . . .	32
2.2.7.1	Propriétés structurelles . . . . .	32
2.2.7.2	Propriétés comportementales (dynamiques) . . . . .	32
2.2.8	Structures particulières des réseaux de Petri [46] . . . . .	33
2.2.9	Domaines d'application des réseaux de Petri . . . . .	34
2.3	Les réseaux de Petri à arcs inhibiteurs . . . . .	34
2.3.1	Définition [46] . . . . .	34
2.3.2	Règle de franchissement [48], [49] . . . . .	35
2.4	Les atouts et les limitations des réseaux de Petri . . . . .	35
2.4.1	Les atouts des réseaux de Petri [57] . . . . .	35
2.4.2	Limitations et insuffisances des réseaux de Petri . . . . .	35
2.5	Les Chaînes de Markov . . . . .	36
2.5.1	Variable aléatoire [50] . . . . .	36
2.5.2	Loi exponentielle [58] . . . . .	36
2.5.3	Loi de Poisson [58] . . . . .	36
2.5.3.1	Processus stochastiques . . . . .	37
2.5.4	Définition [58] . . . . .	37

2.5.4.1	Processus Markovien [59] . . . . .	37
2.5.5	Chaîne de Markov . . . . .	37
2.5.5.1	Chaîne de Markov à temps discret (CMTD) [58] . . . . .	37
2.5.5.2	Chaîne de Markov à temps continu (CMTC) . . . . .	38
2.5.6	Les propriétés des chaînes de Markov [60], [61], [62], [116] . . . . .	39
2.5.7	Analyse des chaînes de Markov [63], [116] . . . . .	40
2.5.8	Avantages des chaînes de Markov . . . . .	40
2.5.9	Inconvénients des chaînes de Markov . . . . .	40
2.6	Les réseaux de Petri stochastiques (RDPS) . . . . .	40
2.6.1	Définition informelle [115] . . . . .	40
2.6.2	Définition formelle [65] . . . . .	41
2.6.3	Evolution des réseaux de Petri stochastiques [59] . . . . .	41
2.6.3.1	Le temps moyen de séjour dans un marquage [66] . . . . .	41
2.6.4	Isomorphisme d'un RDPS avec une chaîne de Markov [61] . . . . .	42
2.6.5	Analyse des RDPS . . . . .	42
2.6.5.1	Analyse qualitative . . . . .	42
2.6.5.2	Analyse quantitative . . . . .	42
2.6.5.3	Etapes de l'évaluation des performances quantitatives des RDPS . . . . .	42
2.7	Les réseaux de Petri stochastiques généralisés (RDPSG) . . . . .	43
2.7.1	Définition informelle [59] . . . . .	43
2.7.2	Définition formelle . . . . .	44
2.7.3	Processus Stochastique associé à un RDPSG . . . . .	44
2.7.4	Les règles de franchissement dans les RDPSG . . . . .	45
2.7.5	Analyse des performances d'un RDPSG [59], [50] . . . . .	45
2.7.5.1	Analyse qualitative . . . . .	45
2.7.5.2	Analyse quantitative . . . . .	46
2.7.5.3	Évaluation des indices de performance d'un RDPSG [69] . . . . .	46
2.7.5.4	Calcul des indices de performances à l'état stationnaire . . . . .	46
2.8	Conclusion . . . . .	47
<b>3</b>	<b>Stratégies de contrôle d'admission des appels dans les réseaux mobiles cellulaires.</b>	<b>48</b>
3.1	Introduction . . . . .	48
3.2	Contrôle d'admission des appels (CAC : Call Admission Control) . . . . .	48
3.3	Stratégies de favorisation des appels de handovers . . . . .	49
3.3.1	Stratégie de la réservation des canaux de garde (GCS) . . . . .	50
3.3.2	Stratégie de la mise en file d'attente des appels de handovers (QPS) . . . . .	52
3.3.3	Stratégie de Sub-rating (SRS) . . . . .	54
3.4	Aperçu bibliographique (Travaux relatifs) . . . . .	54
3.4.1	Modèles de CAC sans la prise en considération du phénomène de rappel . . . . .	55
3.4.1.1	Modèles de CAC à classe de service unique et allocation statique . . . . .	55
3.4.1.2	Modèles de CAC à classe de service unique et allocation dynamique . . . . .	56
3.4.1.3	Modèles de CAC à classes de services multiples et allocation statique . . . . .	57
3.4.1.4	Modèles de CAC à classes de services multiples et allocation dynamique . . . . .	60
3.4.1.5	Critique des modèles de CAC sans la prise en considération du phénomène de rappel . . . . .	61

3.4.2	Modèles de contrôle d'admission avec la prise en considération du phénomène de rappel . . . . .	61
3.4.2.1	Modèles de CAC à classe de service unique et allocation statique . . . . .	61
3.4.2.2	Modèles de CAC à classes de services multiples et allocation statique . . . . .	68
3.5	Synthèse récapitulative . . . . .	68
3.6	Conclusion . . . . .	69
<b>4</b>	<b>Modélisation et évaluation des performances des stratégies de contrôle d'admission avec rappel et canaux gardiens dans les réseaux <i>SCNs</i>.</b>	<b>70</b>
4.1	Introduction . . . . .	70
4.2	Évaluation des performances d'une stratégie de CAC avec rappel des nouveaux appels, source finie et $g$ canaux gardiens . . . . .	71
4.2.1	Description mathématique . . . . .	71
4.2.2	Analyse du modèle . . . . .	73
4.2.2.1	Formulation du modèle en une CMTC . . . . .	73
4.2.2.2	Algorithme d'analyse . . . . .	73
4.2.3	Indices de performance [1], [50] . . . . .	81
4.2.4	Le formalisme des RDPSG et les stratégies de CAC dans les réseaux mobiles cellulaires . . . . .	84
4.2.5	Modélisation avec RDPSG de la stratégie de CAC avec rappel des nouveaux appels, source finie et réservation de $g$ canaux gardiens . . . . .	84
4.2.5.1	Description du modèle . . . . .	84
4.2.5.2	Analyse du RDPSG et indices de performances [112], [113] . . . . .	87
4.3	Proposition d'une nouvelle stratégie de CAC avec canaux gardiens empruntables et une priorité de rappel (PFR-GCBS) . . . . .	89
4.3.1	Description de la nouvelle stratégie de CAC avec priorité de rappel (PFR-GCBS) . . . . .	90
4.3.2	Modélisation et analyse d'une micro-cellule avec la stratégie PFR-GCBS par RDPSG . . . . .	93
4.3.2.1	Description du RDPSG . . . . .	93
4.3.2.2	Analyse du RDPSG et indices de performances [114] . . . . .	95
4.4	Conclusion . . . . .	96
<b>5</b>	<b>Implémentation et expérimentation</b>	<b>97</b>
5.1	Introduction . . . . .	97
5.2	Étude de cas du modèle de CAC avec rappel, source finie et réservation de $g$ canaux gardiens . . . . .	97
5.2.1	Présentation de l'environnement de l'outil d'évaluation des performances . . . . .	98
5.2.2	Étude expérimentale . . . . .	98
5.2.2.1	La probabilité de blocage des appels en fonction du taux d'arrivée . . . . .	99
5.2.2.2	La probabilité de blocage des appels en fonction du taux de rappel . . . . .	100
5.2.2.3	L'influence de la taille de la population de la micro-cellule sur la probabilité de blocage des appels . . . . .	100
5.2.2.4	Les performances du réseau en fonction du nombre de canaux gardiens . . . . .	101
5.3	Etude de cas de la nouvelle stratégie de CAC avec canaux gardiens empruntables et priorité de rappel ( <i>PFR-GCBS</i> ) . . . . .	102

5.3.1	Description du GreatSPN [50] . . . . .	103
5.3.2	Étude expérimentale . . . . .	104
5.3.2.1	La probabilité de blocage des appels en fonction du taux d'arrivée des nouveaux appels . . . . .	104
5.3.2.2	La probabilité de blocage des appels en fonction du taux d'arrivée des appels de handovers . . . . .	105
5.3.2.3	La probabilité de blocage des appels en fonction du taux de rap- pel des nouveaux appels . . . . .	106
5.3.2.4	La probabilité de blocage des appels en fonction du taux de rap- pel des appels de handovers . . . . .	106
5.3.2.5	Le nombre moyen de canaux occupés en fonction du taux d'ar- rivée des appels . . . . .	107
5.3.2.6	La probabilité de blocage des appels en fonction du nombre de canaux gardiens empruntables (t) . . . . .	108
5.4	Conclusion . . . . .	109
<b>Bibliographie</b>		<b>vii</b>

## TABLE DES FIGURES

1.1	Classes des réseaux mobiles sans fil. . . . .	5
1.2	Le modèle de réseau avec infrastructure fixe . . . . .	5
1.3	Architecture générale d'un réseau mobile cellulaire. . . . .	6
1.4	Découpage d'une zone géographique en cellules. . . . .	7
1.5	Modélisation de cellules. . . . .	7
1.6	Hierarchie des cellules dans un réseau cellulaire. . . . .	8
1.7	Gain de capacité réalisé par la réutilisation des fréquences. . . . .	9
1.8	Les méthodes d'accès multiple au support radio. . . . .	10
1.9	L'architecture générale d'un réseau GSM. . . . .	11
1.10	Architecture du réseau UMTS. . . . .	16
1.11	Architecture du réseau UMTS. . . . .	16
1.12	Le transfert intercellulaire dans les réseaux mobiles cellulaires. . . . .	21
1.13	Le Hard handover. . . . .	22
1.14	Le Seamless handover. . . . .	22
1.15	Le Soft handover. . . . .	23
2.1	Exemple d'un réseau de Petri. . . . .	27
2.2	Exemple de réseau de Petri marqué. . . . .	29
2.3	Exemple d'évolution d'un RDP. . . . .	30
2.4	Exemple d'un arc inhibiteur. . . . .	34
3.1	Modèle de système avec priorité des appels de handovers et canaux gardiens. . . . .	50
3.2	Organigramme de la stratégie de canaux de garde (GCS) [74]. . . . .	51
3.3	Zone de handover. . . . .	52
3.4	Modèle avec priorité et mise en file d'attente des appels de handovers. . . . .	52
3.5	Organigramme de la stratégie de mise en file d'attente des appels de handovers[74]. . . . .	53
3.6	Modèle de système avec priorité et mise en attente des appels de handovers et de nouveaux appels. . . . .	53
3.7	Organigramme de la stratégie sub-rating (SRS) [74]. . . . .	54
3.8	Modèle de réservation des canaux gardiens avec mise en file d'attente des appels. . . . .	55
3.9	Modèle à réservation dynamique des canaux gardiens et mise en file d'attente des appels de handovers. . . . .	57
3.10	Modèle de réservation des canaux gardiens avec mise en file d'attente des appels de handovers et trafic à classe de service multiple. . . . .	59

3.11	Modèle de réservation dynamique des canaux gardiens partageables avec mise en file d'attente des appels et trafic à classe de service multiple. . . . .	60
3.12	Mécanisme de CAC avec rappel, population finie et canaux homogènes. . . . .	62
3.13	Mécanisme de CAC avec rappel et réservation d'un seul canal gardien. . . . .	62
3.14	Réservation des canaux gardiens avec rappel des nouveaux appels et mise en file d'attente des appels de handovers bloqués. . . . .	64
3.15	Modèle de file d'attente avec rappel. . . . .	67
4.1	Modèle de CAC avec rappel des nouveaux appels bloqués, source finie et réservation de $g$ canaux gardiens. . . . .	72
4.2	Diagramme d'état de transition de la stratégie de CAC avec rappel, source finie et $g$ canaux gardiens. . . . .	74
4.3	Le flux du trafic global offert dans la micro-cellule. . . . .	82
4.4	RDPSG modélisant la stratégie de CAC avec rappel des nouveaux appels, réservation de $g$ canaux gardiens et source finie. . . . .	86
4.5	Découpage de l'ensemble des canaux d'une micro-cellule selon la stratégie PFR-GCBS. . . . .	91
4.6	Modèle de CAC de la stratégie PFR-GCBS. . . . .	91
4.7	RDPSG modélisant la stratégie PFR-GCBS. . . . .	94
5.1	La fenêtre principale de l'outil d'analyse des performances de modèle de CAC avec rappel, source finie et $g$ canaux gardiens dans les réseaux <i>SCNs</i> . . . . .	98
5.2	La probabilité de blocage des appels en fonction du taux d'arrivée de nouveaux appels. . . . .	99
5.3	La probabilité de blocage des appels en fonction du taux d'arrivée des appels de handovers. . . . .	99
5.4	La probabilité de blocage des appels en fonction du taux de rappel. . . . .	100
5.5	L'influence de la taille de la population de la micro-cellule sur la probabilité de blocage des appels. . . . .	101
5.6	La probabilité de blocage des appels en fonction du nombre des canaux gardiens ( $g$ ). . . . .	102
5.7	Le nombre d'appels dans le système en fonction du nombre des canaux gardiens ( $g$ ). . . . .	102
5.8	L'implémentation du modèle de la stratégie <i>PFR-GCBS</i> sous GreatSPN 2.0.2. . . . .	103
5.9	La probabilité de blocage des appels en fonction du taux d'arrivée de nouveaux appels. . . . .	104
5.10	La probabilité de blocage des appels en fonction du taux d'arrivée des appels de handovers. . . . .	105
5.11	La probabilité de blocage des appels en fonction du taux de rappel des nouveaux appels. . . . .	106
5.12	La probabilité de blocage des appels en fonction du taux de rappel des appels de handovers. . . . .	107
5.13	Le nombre moyen de canaux occupés en fonction du taux d'arrivée des appels. . . . .	107
5.14	La probabilité de blocage des appels en fonction du nombre de canaux gardiens empruntables ( $t$ ). . . . .	108

## LISTE DES TABLEAUX

1.1	Tableau récapitulatif des différents types de cellules. . . . .	8
1.2	Tableau récapitulatif de l'évolution des différentes générations des réseaux mobiles cellulaires. . . . .	19

# Introduction Générale

Les réseaux mobiles cellulaires jouent un rôle primordial dans le monde moderne à cause de leur flexibilité. Ces réseaux ont connu un développement sans précédent ces dernières années, avec plus de 3.2 billion d'abonnés actuellement et une augmentation centuple du trafic est prévue pour l'année prochaine. Les architectures actuelles des réseaux mobiles cellulaires ne sont plus capables de gérer de façon satisfaisante cette hausse massive du trafic. Les réseaux micro-cellulaires ou les réseaux à petite cellules *SCNs* (*Small Cell wireless Networks*), principalement caractérisés par un nouveau paradigme de gestion des réseaux cellulaires dit *small cell*, basés sur l'idée de diviser la macro-cellule en des cellules plus petites, semble une solution très prometteuse à ce problème. L'objectif principal des *SCNs* est l'augmentation de la capacité du réseau, l'amélioration de sa couverture et la réduction de la consommation énergétique du réseau.

Un des grands challenges dans les réseaux mobiles cellulaires est la mobilité des usagers durant une même communication (changement de cellules). En effet, la disponibilité des ressources radios durant toute la durée de la communication n'est pas nécessairement garantie, et ces utilisateurs peuvent subir une dégradation ou même une rupture de la communication lors d'un passage d'une cellule à une autre. Cet événement, appelé *transfert inter-cellulaire* (*Handoff* ou *Handover*), doit être transparent à l'utilisateur [5]. Dans les réseaux mobiles cellulaires, en particulier lorsque les *small cells* sont utilisées, la procédure de handover est très fréquente et a un impact significatif sur les performances du réseau. En effet, la terminaison forcée de l'appel est un phénomène très gênant pour l'abonné et elle est considérée beaucoup plus désagréable qu'un échec de connexion. De ce fait, il est parfois préférable de bloquer un nouvel appel et d'accepter un appel de handover. Ainsi, implanter des mécanismes de contrôle d'admission permettant de réduire la probabilité de coupure des communications devient très important.

Les techniques de contrôle d'admission des appels (*CAC* : *Call Admission Control*) dans les réseaux mobiles cellulaires ont attiré beaucoup d'attention au cours des deux dernières décennies et de nombreuses méthodes de *CAC* sont proposées. Elles permettent de garantir aux appels admis dans une cellule une faible probabilité de coupure et de bloquer les appels dont les ressources demandées ne sont pas disponibles, en favorisant les arrivées des appels de handovers par rapport aux arrivées des nouveaux appels. Parmi les techniques de *CAC* qui visent la favorisation des appels de handovers les plus utilisées de nos jours, on trouve la technique de la mise en file d'attente des appels de handovers et celle de la réservation des canaux gardiens. La technique des canaux gardiens consiste à réserver un nombre fixe ou dynamique de canaux, parmi la totalité des canaux disponibles dans chaque cellule exclusivement pour les appels de handovers, les autres canaux restants sont partagés entre les nouveaux appels et les appels de handovers. Ce traitement préférentiel donne de bonnes performances, mais, en contrepartie, la probabilité de blocage des nouveaux appels est généralement augmentée et le trafic accepté est réduit, ce qui dégrade l'utilisation de la bande passante. Dans le *CAC*, la probabilité de blocage d'un nouvel appel et celle du blocage d'un appel de handover sont considérées comme des paramètres judicieux de la *QoS*. Par conséquent, un bon modèle de *CAC* doit équilibrer ces deux mesures afin de garantir une meilleur *QoS* [70], [36].

Aussi, les utilisateurs des réseaux mobiles cellulaires sont généralement caractérisés par un comportement un peu particulier qui les pousse toujours à rappeler le service ultérieurement s'ils trouvent tous les canaux d'une cellule occupés. Ce phénomène dit phénomène de rappel (ou d'appel répété) a une forte influence sur les performances du réseau.

Cependant, l'étude de ces réseaux avec la prise en considération des appels répétés par le modèle conventionnel des files d'attentes avec rappel (*FAR*) pourrait être assez compliquée. En fait, la présence de plusieurs caractéristiques (serveurs multiples, l'hétérogénéité en plus du rappel) dans un même système, introduit de grandes difficultés analytiques et de multiples problèmes de synchronisation. D'autre part, les réseaux de Petri stochastiques généralisés (*RDPSG*) constituent une alternative très puissante pour la représentation graphique et l'analyse qualitative et quantitative des performances des réseaux hétérogènes avec rappel, et semble plus flexible comparée aux *FAR*, ceci grâce à leur aptitude à représenter les phénomènes de blocage liés aux appels répétés, aux aspects de synchronisation, de concurrence, de parallélisme ainsi que d'autres phénomènes stochastiques dans un même modèle [50].

### Objectifs et Contributions

Dans ce mémoire, nous nous intéressons à la modélisation et l'évaluation des performances de deux stratégies de *CAC* ainsi qu'à l'étude de l'impact de l'utilisation des canaux gardiens dans les stations de base des réseaux *SCNs* (où la taille de la population des abonnés est considérée *finie*) pour l'amélioration de la qualité de service offerte aux abonnés, tout en prenant en compte le phénomène de rappel qui caractérise particulièrement les réseaux téléphoniques. Dans ce sens, nous présentons au début un état de l'art détaillé des différents mécanismes de *CAC* appliqués dans les réseaux mobiles cellulaires et basés sur la technique des canaux gardiens et ses dérivées. Ensuite, notre travail présente deux contributions principales :

- Nous proposons dans une première partie, l'analyse d'un modèle de *CAC* avec rappel, source finie et  $g$  canaux gardiens, à l'aide du formalisme des chaînes de Markov à temps continu. Nous proposons dans ce cadre une généralisation de l'algorithme de ***Tran-Gia*** et ***Mandjes*** [1] à un nombre quelconque de canaux gardiens tout en considérant une source d'abonnés finie, et ce pour calculer les différentes probabilités d'états stationnaires. Nous présentons ensuite la modélisation et l'analyse du même mécanisme par les *RDPSG*.
- Dans une seconde partie, nous proposons une nouvelle stratégie de *CAC* basée sur l'utilisation des canaux gardiens *empruntables* et une priorité pour les appels répétés bloqués initiés dans la micro-cellule, et ce à l'aide des *RDPSG*, dans le but de maximiser l'utilisation du canal et diminuer la probabilité de blocage des nouveaux appels. Cette priorité de rappel est assurée grâce à un nouveau concept dit d'*emprunt de canaux gardiens*. Ce dernier, repose sur une légère modification de la sémantique des canaux gardiens de manière à ce qu'une partie d'entre eux puisse être empruntée et allouée temporairement aux rappels des nouveaux appels bloqués. Cette priorité permet d'améliorer la probabilité de blocage globale des nouveaux appels et d'augmenter l'utilisation des canaux.

### Organisation du document

Le mémoire présenté est structuré en cinq chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les réseaux mobiles cellulaires et leurs générations, ainsi que les principaux éléments de base utiles à la compréhension de notre travail, tel que : la notion de division cellulaire, la taille d'une cellule, transfert inter-cellulaire, etc.

Le deuxième chapitre a pour objet la présentation du formalisme des réseaux de Petri stochastiques généralisés. Dans un premier lieu, nous exposons une description des concepts fondamentaux des réseaux de Petri classiques, qui constituent la base de tous les réseaux de Petri de haut-niveau, tels que les réseaux de Petri stochastiques et les réseaux de Petri stochastiques généralisés, que nous présentons plus loin. Aussi, nous donnons quelques rappels concis sur la théorie des probabilités, notamment les processus stochastiques et les chaînes de Markov.

Dans le troisième chapitre, nous donnons un état de l'art détaillé des mécanismes de contrôle d'admission des appels dans les réseaux mobiles cellulaires. Dans un premier lieu, nous citons les différentes techniques de contrôle d'admission des appels. Ensuite, nous exposons un survol bibliographique sur les différents travaux réalisés dans ce domaine.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons notre contribution relative à l'étude et l'analyse des stratégies de contrôle d'admission avec rappel, source finie et canaux gardiens. Dans une première partie, nous présentons le modèle décrivant la stratégie de *CAC* avec rappel, source finie et  $g$  canaux gardiens à l'aide du formalisme des chaînes de Markov à temps continu puis à l'aide des *RDPSG*. Après dans la deuxième partie, nous présentons une nouvelle stratégie de *CAC* avec priorité de rappel et canaux gardiens empruntables, en utilisant le formalisme des *RDPSG*. Aussi, nous analysons le modèle correspondant à chaque stratégie de *CAC* et nous développons les formules des principaux indices de performances.

Le dernier chapitre est consacré à l'implémentation et l'étude expérimentale et comparative des modèles de *CAC* proposés. Et en fin, une conclusion générale résumera les différents points abordés à travers ce mémoire, les résultats et les conclusions tirés, ainsi que quelques perspectives intéressantes de notre travail.

# CHAPITRE 1

## GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX MOBILES CELLULAIRES.

### 1.1 Introduction

Les réseaux mobiles sans fil connaissent actuellement un énorme succès. L'avantage de tels systèmes est la possibilité de communiquer de n'importe où, même en se déplaçant sans le besoin d'une liaison filaire. Ces derniers peuvent être classés en deux catégories : les réseaux cellulaires avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure (Ad hoc).

Les réseaux mobiles cellulaires, sont sans aucun doute, ceux qui ont connu la plus grande évolution ces dernières années. Cela est principalement dû à l'explosion du nombre d'abonnés, la demande sans cesse croissante de débit et l'apparition des applications multimédias. Ces réseaux sont basés sur l'utilisation de l'interface radio et la réutilisation de fréquences, ainsi que sur la technologie de la division cellulaire. Il s'agit du déploiement de plusieurs générations successives de réseaux de télécommunications, essentiellement dédiées à la téléphonie ((1G, ETACS), (2G, GSM)) puis plus orientées vers le multimédia ((3G, UMTS), (4G, LTE)), ce qui a permis d'améliorer la qualité du service (QoS) offert aux utilisateurs mobiles d'une génération à l'autre.

Un des grands challenges pour les réseaux mobiles cellulaires est la gestion de la mobilité des usagers durant une même communication. En effet, la disponibilité des ressources radios durant toute la durée de la communication n'est pas nécessairement garantie, et ces utilisateurs peuvent subir une dégradation ou même une rupture de la communication lors d'un passage d'une cellule à une autre. Cet événement est appelé *transfert inter-cellulaire ou handover*. Les réseaux cellulaires doivent assurer le maintien de cette communication au cours du déplacement du terminal, d'une façon transparente à l'utilisateur.

Dans ce chapitre, nous présentons le concept des réseaux mobiles cellulaires. Dans la première partie, nous présentons les concepts de base des réseaux mobiles cellulaires. Ensuite, nous nous focalisons sur l'évolution des différentes générations de ces réseaux. Plus loin, nous détaillons le concept du transfert inter-cellulaire (handover), et nous terminons le chapitre par une conclusion.

## 1.2 Les environnements mobiles et les réseaux sans fil

Un réseau mobile sans fil (Wireless mobile network) est, comme son nom l'indique, un réseau dans lequel les terminaux sont mobiles, peuvent se déplacer librement et communiquer indépendamment de leurs positions géographiques sans le besoin d'une liaison filaire [2].

### 1.2.1 Classes des réseaux mobiles sans fil

Les réseaux mobiles sans fil peuvent être classés selon l'architecture de communication adoptée en deux catégories :

- Les réseaux cellulaires **avec infrastructure fixe**.
- Les réseaux Ad hoc **sans infrastructure fixe**.

Plusieurs technologies sont apparentées aux réseaux cellulaires comme : GSM, WiMax, GPRS, UMTS, etc., et aux réseaux mobiles Ad Hoc comme les WSNs, VANETs et les réseaux de Mesh.

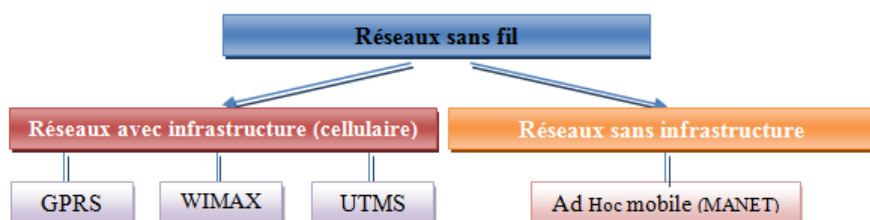


FIGURE 1.1 – Classes des réseaux mobiles sans fil.

- **Les réseaux mobiles sans fil avec infrastructure fixe (réseaux cellulaires)** : Les réseaux mobiles avec infrastructure fixe (par exemple : GSM) sont des réseaux structurés, basés sur des équipements d'interconnexion faisant office de ponts entre un réseau radio et un réseau câblé, permettant ainsi à de nombreux utilisateurs mobiles d'accéder à des ressources informatiques. Par exemple, ils sont composés de deux ensembles d'entités distinctes : les sites fixes du réseau filaire (wired network) et les sites mobiles du réseau sans fil (wireless network). Certains sites fixes, appelés Stations de Base (SB) sont munis d'une interface de communication sans fil pour la communication directe avec les unités mobiles (UM), localisées dans une zone géographique limitée appelée cellule (voir la figure 1.2) [3].

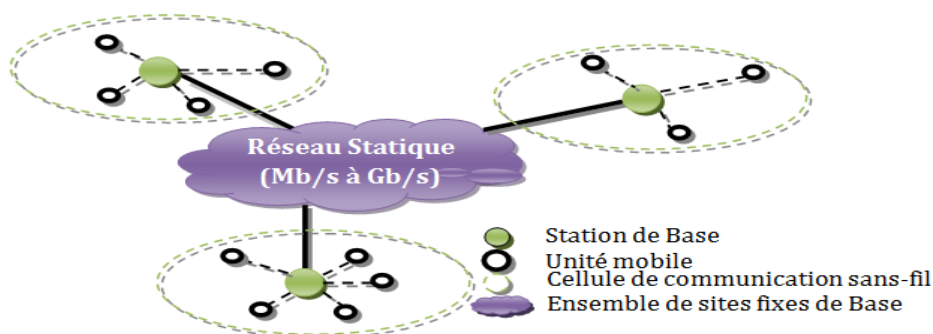


FIGURE 1.2 – Le modèle de réseau avec infrastructure fixe.

- **Les réseaux sans infrastructure (ad-hoc)** : Ces réseaux sont composés d'unités mobiles communiquant entre elles sans la nécessité d'une infrastructure fixe [4].

## 1.3 Les réseaux mobiles cellulaires

Les réseaux mobiles cellulaires offrent la possibilité d'acheminer automatiquement une communication jusqu'au destinataire, quelque soit l'endroit où il se trouve. Les réseaux cellulaires doivent assurer le maintien de cette communication au cours du déplacement du terminal d'une façon transparente à l'utilisateur [5].

Les réseaux mobiles cellulaires reposent sur deux principes fondamentaux à savoir :

- Le découpage en cellules ;
- La réutilisation de fréquences.

Ils gèrent principalement deux fonctions de base :

- Le trafic intercellulaire (ou handover) ;
- L'itinérance (ou Roaming).

### 1.3.1 Architecture générale d'un réseau mobile cellulaire

Les réseaux mobiles cellulaires sont basés sur la technologie de cellule. Comme illustré dans la figure 1.3, ces réseaux comportent trois niveaux d'hierarchie. Au premier niveau se trouve le sous-réseau, qui a la charge d'enregistrer le profil d'un abonné. Le deuxième niveau est constitué par la zone de localisation, qui regroupe l'ensemble des cellules, et le dernier niveau par la station de base, qui dessert la cellule [6].

Généralement, un réseau mobile cellulaire se compose de plusieurs éléments de base [6] :

- L'unité mobile (le terminal) : permet à l'abonné d'accéder aux services du réseau.
- La station de base ou BTS (Base Transceiver Station) : intègre l'équipement radio/antenne assurant la communication radio entre les équipements des abonnés et les structures fixes spécifiques au réseau. Elle gère une ou plusieurs cellules.
- Contrôleur de stations de base ou BSC (Base Station Controller) : gère les ressources radio et les bandes passantes des stations de base associées.
- Le BSC et l'ensemble des BTS qui lui sont raccordés constituent un sous-système radio, ou BSS (Base Station Subsystem). Les BSC sont tous raccordés à des commutateurs du service mobile, appelés MSC (Mobile services Switching Center).

Pour plus de détails, consulter la section 1.4.2.1.

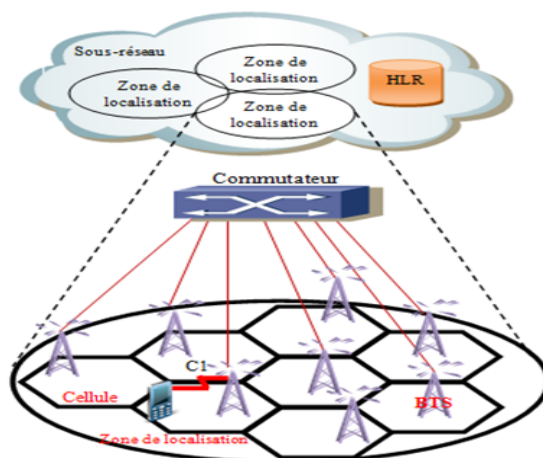


FIGURE 1.3 – Architecture générale d'un réseau mobile cellulaire.

### 1.3.2 Notions de bases

#### 1.3.2.1 Le concept cellulaire

Le concept cellulaire a été introduit dans les années 70 par les *Bell Labs*. Les systèmes cellulaires ont été conçus pour augmenter la mobilité des terminaux. Une cellule est une zone géographique couverte par une antenne de transmission appelée *station de base* [5]. Une cellule est caractérisée par : sa puissance d'émission (zone de couverture), la fréquence de la porteuse utilisée pour l'émission radioélectrique et le réseau auquel elle est connectée.

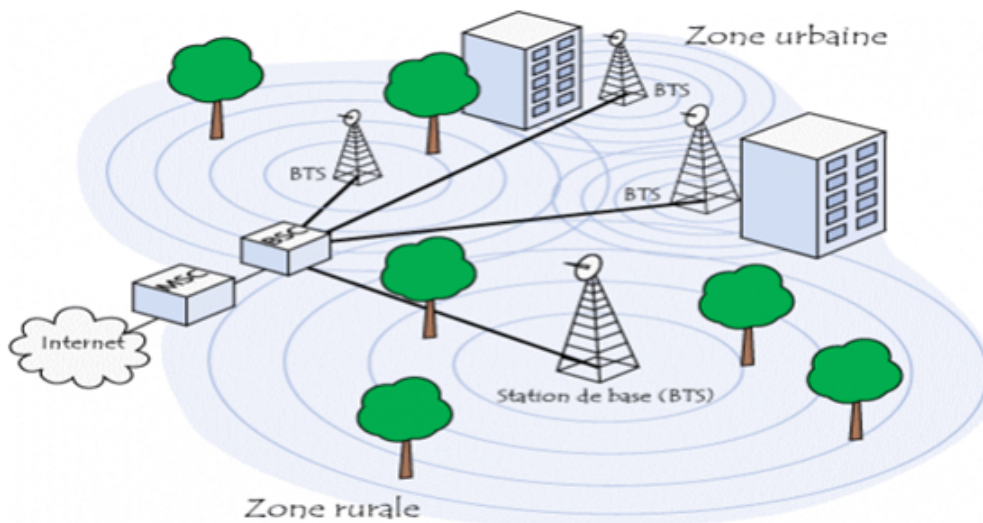


FIGURE 1.4 – Découpage d'une zone géographique en cellules.

La division cellulaire a pour but de [7] :

- Garantir l'itinérance : le réseau cellulaire doit reconnaître à tout instant la localisation de l'abonné. C'est ce qu'on appelle : gestion d'itinérance ou Roaming.
- Garantir la mobilité : par des procédures automatiques dites de transfert ou de handover, la communication doit être maintenue en cours de déplacement du mobile.

#### 1.3.2.2 Modélisation d'une cellule

La cellule est souvent schématisée par un hexagone ; cependant, cette forme ne peut exister dans la réalité. La Figure 1.5 montre ce qui peut ressembler à des cellules réelles. Contrairement à la forme circulaire idéale, l'hexagone régulier représente la forme géométrique la plus proche du cercle, il assure aussi, une couverture jointive du plan sans recouvrement. Il permet aussi un contour de niveau du signal constant depuis une antenne omnidirectionnelle. C'est pourquoi, les ingénieurs de planification utilisent cette forme lors de la conception des réseaux [5].

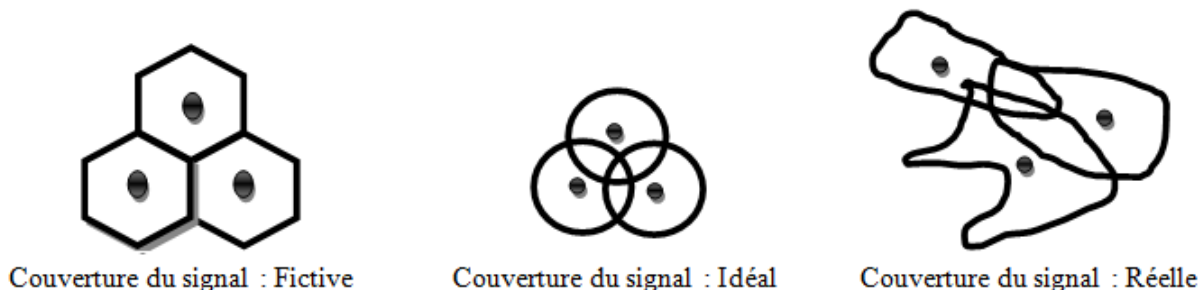


FIGURE 1.5 – Modélisation d'une cellule.

### 1.3.2.3 Taille de la cellule

La taille d'une cellule varie en fonction d'un ensemble de contraintes parmi lesquelles nous trouvons : le relief de territoire (plaine, montagne), la localisation (urbaine, rurale, suburbaine), la densité d'abonnés, la nature des constructions (maisons, pavillons, tours), etc. Nous pouvons ainsi distinguer plusieurs types de cellules (voir la figure 1.6) [8] :

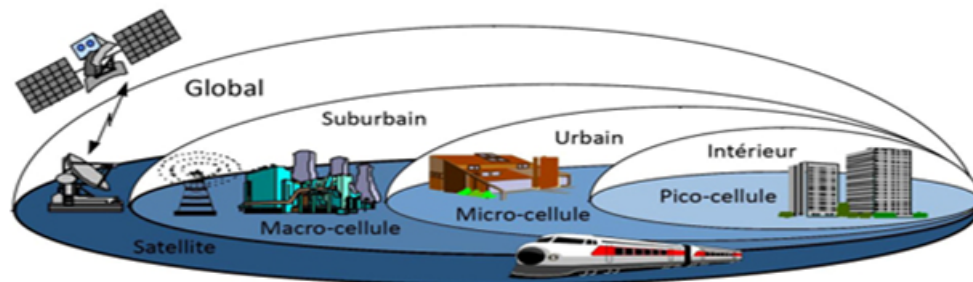


FIGURE 1.6 – Hiérarchie des cellules dans un réseau cellulaire.

- **La cellule globale** (Cellule umbrella (parapluie)) : couvrant une région pouvant atteindre le tiers du globe grâce aux satellites ;
- **Les macro-cellules** : Ce sont des cellules de taille importante allant jusqu'à 35 Km de rayon, adaptées aux zones rurales faiblement peuplées ;
- **Les micro-cellules** : adaptées aux zones urbaines denses, ce sont des cellules de très petites tailles de quelques centaines de mètres de rayon. Elles permettent d'écouler un trafic important par unité de surface ;
- **Les pico-cellules** : de quelques dizaines de mètres de rayon et adaptées à la propagation à l'intérieur des bâtiments.

Types de cellules	Distance	Milieu
Macro-cellule	500 m à plusieurs km	Rural
Micro-cellule	100 m à 500 m	Urbain
Pico-cellule	moins de 100 m	Bâtiments

TABLE 1.1 – Tableau récapitulatif des différents types de cellules.

### 1.3.2.4 La réutilisation des fréquences et le concept de motif

Les fréquences utilisées par une cellule peuvent être utilisées par une autre cellule suffisamment éloignée. Cela peut se faire grâce à la propriété d'atténuation des ondes radios électriques. C'est grâce au principe de réutilisation de fréquences, qu'un opérateur peut augmenter la capacité de son réseau. En effet, il lui suffit de découper une cellule en plusieurs cellules plus petites et de gérer son plan de fréquences pour éviter toute interférence [5]. Ainsi, au lieu d'utiliser une seule cellule pour tout le réseau, la zone de couverture est divisée en petites cellules regroupées en *cluster* (ou *motif cellulaire*) dont la taille dépend du système. À chaque groupe ainsi formé, est attribué l'ensemble des canaux du système. Les cellules utilisant les mêmes fréquences appelées *co-cellules*, doivent être situées à une distance suffisamment grande pour ne pas causer d'interférences dites "*co-canal*"<sup>1</sup>. La distance minimale requise est appelée distance moyenne de réutilisation ( $D$ ), exprimée par la formule suivante :  $D=R\sqrt{3N}$ , tel que,  $R$  est le rayon

1. Les interférences co-canal sont dues aux signaux émis par les autres stations de base utilisant la même fréquence.

de la cellule et  $N$  est la taille du motif. Dans la figure 1.7, par exemple, le système possède  $N$  canaux. Dans un système sans réutilisation, il pourrait y avoir au maximum  $N$  appels. En revanche, dans un système possédant  $K$  motifs de réutilisation,  $K \times N$  communications peuvent être acheminées. Le nombre  $N$  de cellules par motif est donné par :  $N = D^2 / (3R^2)$ . L'objectif dans un réseau cellulaire, est de trouver la plus petite valeur de  $N$  possible donnant un seuil d'interférence minimal requis par le système, ceci permet d'obtenir une utilisation maximale de la bande passante [5]. Pour déterminer le motif minimal à utiliser pour un système donné, nous étudions le rapport entre la puissance du signal utile et la puissance des perturbations qui sont de deux types : interférences (soit des interférences co-canal soit des interférences dues aux canaux adjacents<sup>2</sup>) et le bruit, essentiellement le bruit de fond du récepteur.

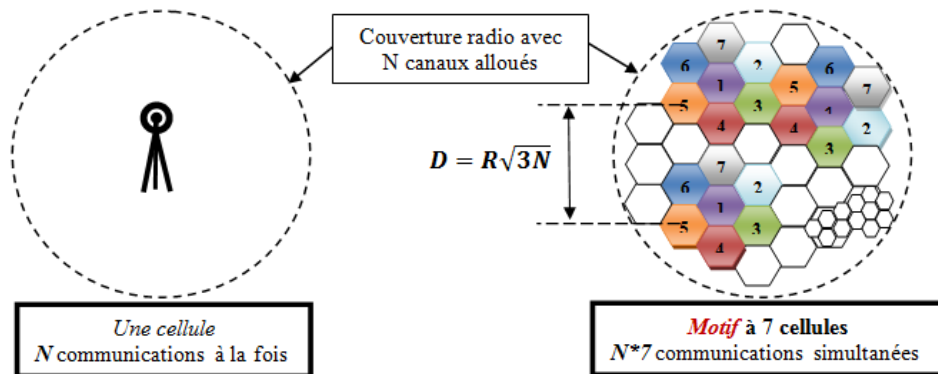


FIGURE 1.7 – Gain de capacité réalisé par la réutilisation des fréquences.

### 1.3.2.5 Les méthodes de base d'accès au support radio

Dans les réseaux mobiles cellulaires, les utilisateurs du réseau se disputent l'accès à l'interface radio. Donc, il faut une technique d'accès qui permette à l'utilisateur d'émettre ses paquets sans risque de collision. Pour cela, le multiplexage semble résoudre le problème de conflit de transmission. Parmi, les différentes techniques d'accès, nous allons présenter les trois suivantes [6] :

- **FDMA (Frequency Division Multiple Access)** : Dans cette technique, la bande de fréquence est divisée en plusieurs sous bandes de largeur fixe, voir la figure 1.8(a). Quand un utilisateur désire effectuer un appel, un des canaux est alors exclusivement alloué à cet utilisateur pendant toute la durée de la communication. Un canal de garde se situe entre chacun de ces canaux pour éviter l'intermodulation.
- **TDMA (Time Division Multiple Access)** : qui se base sur le principe de répartition des utilisateurs dans le temps (découper le temps en tranches et allouer les tranches aux utilisateurs), voir la figure 1.8(b). Pour transmettre les données, chaque utilisateur dispose d'un intervalle de temps appelé *slot* durant lequel la bande de fréquence est libre. Cette technique peut augmenter le nombre d'utilisateurs par rapport à la technique FDMA.
- **CDMA (Code Division Multiple Access)** : qui consiste à allouer aux différents utilisateurs la bande passante globale (les utilisateurs parlent en même temps) mais avec un code tel que tous les signaux soient émis en même temps. Le récepteur étant capable de déterminer les signaux à capter en fonction du code et de la puissance associée, voir la figure 1.8(c). Chaque terminal émet sur une fréquence donnée avec une puissance déterminée par le code.

2. Les interférences de canaux adjacents dues aux signaux émis par les stations de base utilisant des fréquences voisines.

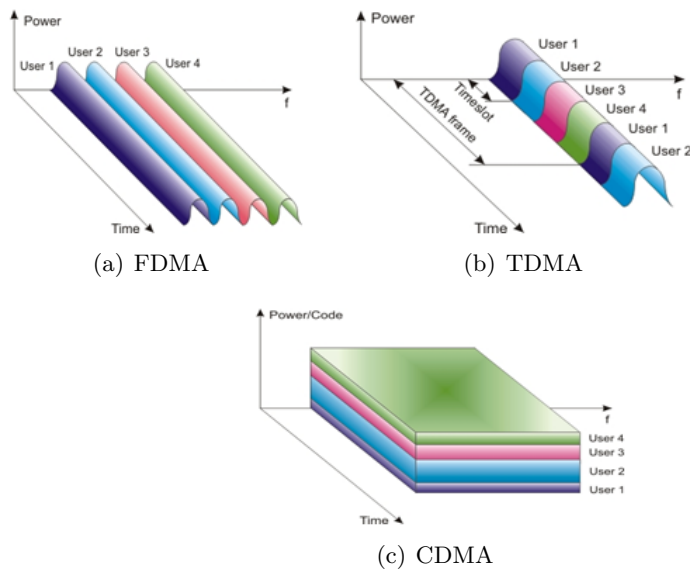


FIGURE 1.8 – Les méthodes d'accès multiple au support radio.

## 1.4 Évolution des réseaux mobiles cellulaires

Cette partie présente un survol sur les caractéristiques principales des quatre générations des réseaux mobiles cellulaires.

### 1.4.1 La première génération (1G)

La première génération de téléphonie mobile (notée **1G**) a vu le jour à la fin des années 1970. Elle possède un fonctionnement analogique et est constituée d'appareils relativement volumineux, coûteux, avec une faible bande passante et à couverture limitée. Cette génération a introduit les concepts de la division cellulaire et de la réutilisation de fréquences. Cette norme ne permet que la transmission de la parole, et une mobilité limitée. S'appuyant sur une technique de modulation FDMA (Frequency Division Multiple Access), ces réseaux ne permettent pas de garantir la confidentialité des communications (absence de mécanisme de sécurité) et sont par ailleurs vite devenus saturés. On y retrouve essentiellement les standards : AMPS (Advanced Mobile Phone System, USA) qui constitue le premier standard des réseaux de 1G, TACS (Total Access Communication System, Europe) et ETACS (Extended Total Access Communication System, Royaume-Uni) : une version améliorée du TACS [9].

### 1.4.2 La deuxième Génération (2G)

La seconde génération des systèmes cellulaires (notée **2G**) est apparue au début des années 90. L'apparition de cette génération a marqué la rupture avec la 1G grâce au passage de l'analogique au numérique. La norme permet la transmission de la parole et des données simultanément. Un important apport par ces systèmes consiste à la modification de la méthode d'accès aux données. Elle offre la possibilité aux abonnés de partager un même canal de transmission, ceci est possible grâce à l'utilisation du mécanisme de division de fréquence FDMA (Frequency Division Multiple Access) et le mécanisme de division de temps TDMA (Time Division Multiple Access). Les performances (efficacité spectrale, sécurité, fonctionnalités) de la seconde génération de systèmes cellulaires sont plus importantes que celles de la première génération [10].

Actuellement, le GSM (Global System for Mobile Communications, Europe) et le CDMA IS-95 (Code Division Multiple Access, USA) constituent des exemples de systèmes numériques de la deuxième génération, parmi les plus utilisés dans le monde [10].

### 1.4.2.1 Réseau GSM

#### A. Présentation

Le GSM (Global System For Mobile Communications), est un standard européen de téléphonie cellulaire de seconde génération, défini par la norme européenne *ETSI* (European Telecommunications Institute), apparu en 1992. L'innovation apportée par ce standard est l'utilisation des technologies numériques qui ont permis d'améliorer la qualité de la voix et d'augmenter considérablement le nombre d'utilisateurs. Un réseau GSM permet bien évidemment d'effectuer des appels téléphoniques mais aussi la transmission de données jusqu'à 9600 bit/s, l'accès à un réseau à commutation de paquets, le transfert de messages courts que l'on appelle SMS (140 caractères au maximum), et tous les services supplémentaires offerts sur les réseaux modernes (renvoi d'appels, signal d'appel, groupe fermé d'usagers, etc.) [11].

#### B. Architecture générale d'un réseau GSM

L'architecture d'un réseau GSM est divisée en quatre sous-systèmes (voir la figure 1.9) [12] :

1. La station mobile (**MS**), qui correspond à un terminal mobile portable.
2. Le sous système radio ou Base Station Sub-system (**BSS**), qui assure et gère les transmissions radios.
3. Le sous système réseau ou Network Sub-System (**NSS**), qui comprend l'ensemble des fonctions nécessaires pour les appels et la gestion de la mobilité.
4. Le sous système d'exploitation et de maintenance ou Operation Sub-System (**OSS**), qui permet l'administration du réseau GSM.

Le détail des fonctions remplies par chaque sous-système est décrit dans les paragraphes suivants.

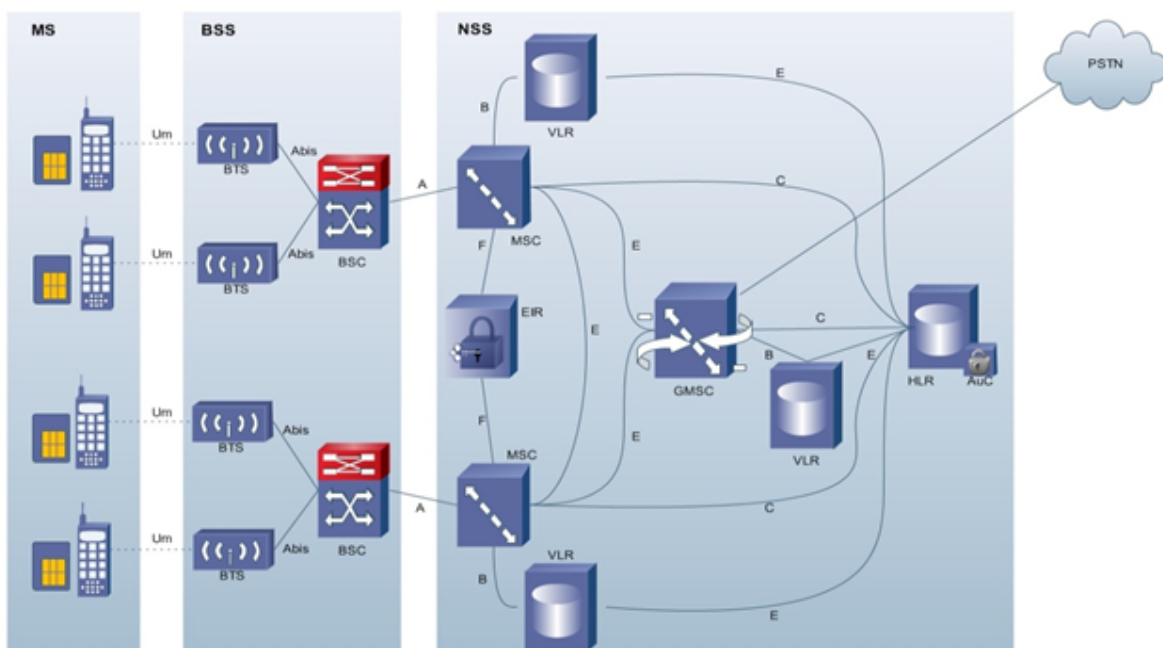


FIGURE 1.9 – L'architecture générale d'un réseau GSM.

### B-1. La station mobile MS (Mobile Station)

La station mobile MS (Mobile Station) permet à l'abonné d'accéder aux services GSM. Elle est composée d'un équipement portable qui contient son identité internationale **IMEI** (International Mobile Equipment Identity) et d'une carte **SIM** (Subscriber Identity Mobile). La carte SIM gère une série d'informations caractérisant un abonné, ainsi que ses droits. Elle se comporte donc comme une mini-base de données qui contient des données spécifiques, comme l'identité internationale de l'abonné **IMSI** (International Mobile Subscriber Identity), le numéro de téléphone connu de l'utilisateur (**MSISDN**, Mobile Station ISDN Number) et la clé **Ki** (Individual Subscriber Authentication Key) servant à l'authentification et au chiffrement de la liaison radio [13].

### B-2. Le sous-système radio BSS (Base Station Sub-system)

Le sous-système radio BSS assure l'acheminement de communications entre le mobile et le réseau ainsi que la gestion du canal radio. Il est constitué de [11] :

1. Une ou plusieurs **BTS** (Base Transceiver Station).
2. Un **BSC** (Base Station Controller).

#### B-2.1. La station de base BTS (Base Tranceiver Station)

La station de base est un ensemble émetteur/récepteur appelé **TRX** pilotant une ou plusieurs cellules. Ce type d'équipement assure l'interface entre les mobiles et les structures fixes spécifiques au GSM. La capacité maximale typique d'une BTS est de 16 porteuses (4 porteuses en zone urbaine). La BTS a la charge de la transmission radio : modulation, démodulation, égalisation, codage correcteur d'erreur. Elle gère plus généralement toute la couche physique : multiplexage TDMA, saut de fréquence lent, chiffrement. La BTS mesure la qualité du signal reçu et le transmet au BSC pour un éventuel handover. On distingue deux types de BTS : les **BTS** normales (classiques) et les *micro-BTS* (équipements de faible taille et de faible coût) qui sont utilisés pour couvrir les zones urbaines denses avec des micros cellules [14], [15].

#### B-2.2. Le contrôleur de station de base BSC (Base Station Controller)

Le BSC contrôle un ensemble de BTS (entre 20 et 30 BTS) et communique avec elles par le biais de *l'interface A-bis*. Il assure principalement la gestion des ressources radios, l'établissement des appels ainsi que la libération des ressources à la fin de chaque appel. Ce contrôleur permet d'aiguiller le trafic provenant du MSC vers les différentes BTS et aussi de concentrer le trafic en provenance des BTS vers le MSC. Enfin, le contrôleur gère les transferts intercellulaires des abonnés dans sa zone de couverture [12], [13].

### B-3. Le sous-système réseau NSS (Network Sub-System)

Le sous-système réseau, prend en charge toutes les fonctions de contrôle et d'analyse d'informations contenues dans des bases de données nécessaires à l'établissement de connexions utilisant une ou plusieurs des fonctions suivantes : chiffrement, authentification ou roaming. Il a pour fonction l'établissement des appels et la gestion de la mobilité [13].

Le *NSS* est constitué de :

1. Le centre de commutation mobile **MSC** (Mobile Switching Center).
2. L'enregistreur de localisation **HLLR** (Home Location Register).
3. L'enregistreur de localisation des visiteurs **VLLR** (Visitor Location Register).

### **B-3.1. Le centre de commutation mobile MSC (Mobile Switching Center)**

Les *MSCs* sont des commutateurs de mobiles généralement associés aux bases de données VLR. Le MSC assure une interconnexion entre le réseau mobile et le réseau fixe public. Le MSC gère l'établissement des communications entre un mobile et un autre MSC, la transmission des messages courts et l'exécution du handover si le MSC concerné est impliqué. Il donne aussi, un accès vers les bases de données du réseau et vers le centre d'authentification qui vérifie les droits des abonnés. Le MSC peut également posséder une fonction de passerelle, GMSC (Gateway MSC) qui est activée au début de chaque appel d'un abonné fixe vers un abonné mobile. Le centre de commutation mobile est relié au sous-système radio via *l'interface A* [16].

### **B-3.2. L'enregistreur de localisation HLR (Home Location Register)**

Il existe au moins un enregistreur de localisation (HLR) par réseau. Il s'agit d'une base de données qui contient toutes les informations concernant le profil des abonnés. A chaque abonné est associée une et une seule entrée dans le HLR, désignant la description de ses droits ainsi que son numéro international *IMSI* et son numéro d'abonné mobile *MSISDN*. En plus, il tient à jour une information qui pointe sur un VLR, lequel indique la zone de localisation où se trouve l'abonné actuellement [8].

### **B-3.3. L'enregistreur de localisation des visiteurs VLR (Visitor Location Register)**

Le VLR est une base de données où sont stockées temporairement les informations concernant chaque mobile, relatives à une région particulière. Nous y trouvons les mêmes informations que dans le HLR avec en plus, l'identité temporaire de l'utilisateur *TMSI* (Temporary Mobile Subscriber Identity) et sa zone de localisation. En pratique, le VLR est souvent associé au MSC. Il permet d'alléger le trafic de signalisation en cas d'un appel sortant où il n'est pas nécessaire de consulter le HLR [7].

## **B-4. Le centre d'exploitation et de maintenance OSS (Operation Sub-System)**

Regroupe trois activités principales de gestion : la gestion administrative, commerciale et technique. Le réseau de maintenance technique s'intéresse au fonctionnement des éléments du réseau [13]. L'OSS permet l'administration du réseau GSM, il gère notamment les alarmes, les pannes, la sécurité, etc. L'OSS est constitué de plusieurs **OMC** (Operations and Maintenance Centers). Ces équipements sont chargés de gérer les incidents mineurs au niveau des BTS, BSC et MSC. Les incidents plus importants, sont gérés par le Network Management Center (**NMC**). Ce sous-système contient également deux bases de données. La première, appelée *Equipment Identity Register (EIR)*, contient les International Mobile Equipment Identity (*IMEI*), qui permet d'identifier l'utilisateur. Cette base est consultée afin de s'assurer que le mobile utilisé par l'abonné est autorisé à accéder au réseau. La seconde base est *l'Authentication Center (AUC)*, elle contient des informations permettant d'identifier chaque abonné au sein du réseau GSM et ainsi d'authentifier les services qui lui sont autorisés. La clé attribuée à chaque utilisateur, qui permet de chiffrer les communications, est également un élément de l'AUC [8].

Pour avoir un débit encore plus élevé que la norme d'origine du GSM, deux extensions du standard GSM ont été créées nommées GPRS noté 2.5G et EDGE noté 2.75G.

### 1.4.2.2 La 2,5 G : Le GPRS

Le GPRS (General Packet Radio Service) apparu en 2001, est la première évolution du GSM, adaptée au transfert de données. Le GPRS propose une commutation de paquets et permet d'atteindre des débits théoriques de 171,2 Kbits/s ce qui concerne l'infrastructure, soit 115 Kbits/s pour l'utilisateur final (en pratique, en moyenne 50kbps). Le GPRS offre un certain nombre de services supplémentaires orientés multimédia, notamment l'accès à Internet et au Web, la diffusion d'informations graphiques. Il offre aussi la possibilité d'obtenir une simultanéité de services grâce au multiplexage. On peut à la fois utiliser conjointement une session GSM et une session GPRS. Ces possibilités dépendent toutefois des classes d'abonnement GPRS (classe<sup>3</sup> : A, B, C) [14], [17], [18].

#### - Architecture du réseau GPRS

Le GPRS peut être installé sans aucune licence supplémentaire. Donc, tous les opérateurs qui disposent d'une licence GSM peuvent faire évoluer leur réseau vers le GPRS. Il faut simplement y adjoindre deux nœuds supplémentaires :

- a. **SGSN** (Serving GPRS Support Node) : ses fonctionnalités principales sont la gestion de la mobilité, et la conversion des données du terminal en paquets de type IP (et réciproquement).
- b. **GGSN** (Gateway GPRS Support Node) : il assure la connexion avec les réseaux de données de type Internet (accès à un réseau local d'entreprise, accès à un serveur Web).

Un module logiciel est toutefois ajouté au BSC : PCU (Packet Control Unit) qui fait la différence entre les données "circuit" de GSM et les données "paquet" de GPRS.

### 1.4.2.3 La 2,75 G : EDGE

Le standard EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) est utilisé comme transition vers la troisième génération de téléphonie mobile. Il est considéré comme une évolution des réseaux GSM et GPRS. Ce dernier permet d'augmenter le débit de la norme GPRS en annonçant un débit théorique de 384 Kbps pour les stations fixes (piétons et véhicules lents) et jusqu'à 144 kbit/s pour les stations mobiles (véhicules rapides) [19].

EDGE repose sur la même architecture de le GPRS, il permet un débit trois fois supérieur au GPRS en passant d'une modulation **GMSK** (Gaussian Minimum-Shift Keying) (transporte 3 bits par symbole) à une modulation en phase la **8-PSK** (octogonal Phase Shift Keying) (transporte 1 bit par symbole) [17].

## 1.4.3 La troisième Génération (3G)

La 3G représente une évolution majeure par rapport à la 2G, en termes de mobilité et de services offerts et propose d'atteindre un débit de données plus élevé, qui peut atteindre les 2Mbps, ouvrant ainsi la porte à des applications multimédia comme la visiophonie, la diffusion du contenu vidéo et audio et l'accès à internet haut débit, etc. [20]

---

3.

- Classe A : usage simultané de tous les services et dans de bonnes conditions ;
- Classe B : idem mais avec une restriction sur la qualité de la parole ;
- Classe C : pas de simultanéité. idem mais avec une restriction sur la qualité de la parole.

Les principales caractéristiques de la 3G sont les suivantes [21] :

- Supporte la mobilité sur une très grande zone géographique (mobilité globale) ;
- Transmission vocale de grande qualité, comparable à celle des réseaux fixes ;
- Intégration des services des différents réseaux fixes et mobiles ;
- Débit élevé, supportant des applications multimédias ;
- Sécurité accrue ;
- La compatibilité avec les systèmes de la 2ème génération (services offerts à l'utilisateur).

Il existe plusieurs formes de 3G dans le monde, chacune d'elles suit les recommandations IMT2000. La 3G en Europe est standardisée par le 3GPP et représentée par la norme UMTS, tandis que le CDMA2000 est utilisé aux Etats-Unis et le TD-SCDMA (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access) en Chine. Au-delà de ces différentes technologies, il existe des évolutions qui permettent d'améliorer les performances de la 3G. En Europe, l'UMTS peut être amélioré en HSDPA, considéré comme 3,5G, puis en HSUPA, considéré comme 3,75G [20].

### 1.4.3.1 UMTS

#### A. Présentation

L'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) est un réseau mobile cellulaire européen de troisième génération appartenant à la famille IMT-2000 (International Mobile Telecommunications for the year 2000), capable d'offrir au grand public des services de type multimédia à débit élevé (entre 384 kb/s à 2 Mb/s) tels que : la visiophonie, jeux vidéo, vidéo à la demande, jeux en réseau, etc. L'UMTS se base principalement sur la technique d'accès multiple large bande WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), cette technique offre la possibilité de desservir simultanément plusieurs utilisateurs sur la même bande de fréquence. La bande de fréquence de fonctionnement utilisé par l'UMTS est 1900MHz - 2000MHz. Cette bande élevée et les débits à la fois importants et variables, nécessite des cellules de taille nettement plus petite que les macro-cellules actuelles. Cela conduira à un réseau au coût plus élevé, onéreux en infrastructures [22], [14].

UMTS utilise deux techniques de multiplexage sur la voie radio : **TDD** (Time Division Duplex) et **FDD** (Frequency Division Duplex). La première utilise un multiplexage temporel à la manière de TDMA (une seule fréquence est utilisée alternativement par les deux voies montante et descendante) tandis que la seconde utilise un multiplexage fréquentiel à la manière de FDMA (deux fréquences différentes pour la voie montante et la voie descendante).

#### B. Architecture

Le réseau UMTS vient se combiner aux réseaux déjà existants (GSM, GPRS). Il est important de noter que le coût de la mise en place d'un système UMTS est élevé (achat licence + modifications majeures sinon totales des éléments de base du réseau (BTS)).

Le réseau UMTS repose sur une architecture modulaire. Une telle architecture, comme l'illustre la figure 1.10, est composée de trois domaines : le domaine de l'équipement de l'utilisateur UE (User Equipment), celui du réseau d'accès radio universel UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network) et celui du réseau cœur CN (Core Network). Les domaines du réseau d'accès et du réseau cœur constituent le domaine de l'infrastructure [23].



FIGURE 1.10 – Architecture du réseau UMTS.

### B-1. Le domaine de l'équipement de l'utilisateur UE (User Equipment)

Le domaine UE comprend tous les équipements terminaux et permet à l'abonné l'accès à l'infrastructure et à ses services par le biais de l'interface  $Uu$ . Il est constitué de deux domaines : l'équipement mobile ME (Mobile Equipment) qui gère l'interface radio et le modèle d'identité des services de l'abonné ou carte USIM (Universal Subscriber Identity Module) qui contient les caractéristiques de l'utilisateur et de son abonnement [22].

### B-2. Le domaine d'accès radio UTRAN

Contrairement aux deux autres domaines qui reprennent des concepts existants, le domaine d'accès radio est complètement différent. Ce domaine gère les ressources radio, l'établissement, la maintenance et la libération des canaux radios entre le terminal et le réseau cœur. Il permet aux utilisateurs mobiles de communiquer avec le réseau cœur et contrôle les fonctions liées à la mobilité et à l'accès au réseau [22].

Le domaine UTRAN est composé d'un ensemble de sous-systèmes nommés RNS (Radio Network Sub-system) qui peuvent être connectés entre eux grâce à l'interface  $Iur$ , comme le montre la figure 1.11. Le RNS se scinde en deux éléments : un ou plusieurs Node-B et le RNC (Radio Controller Network) [22].

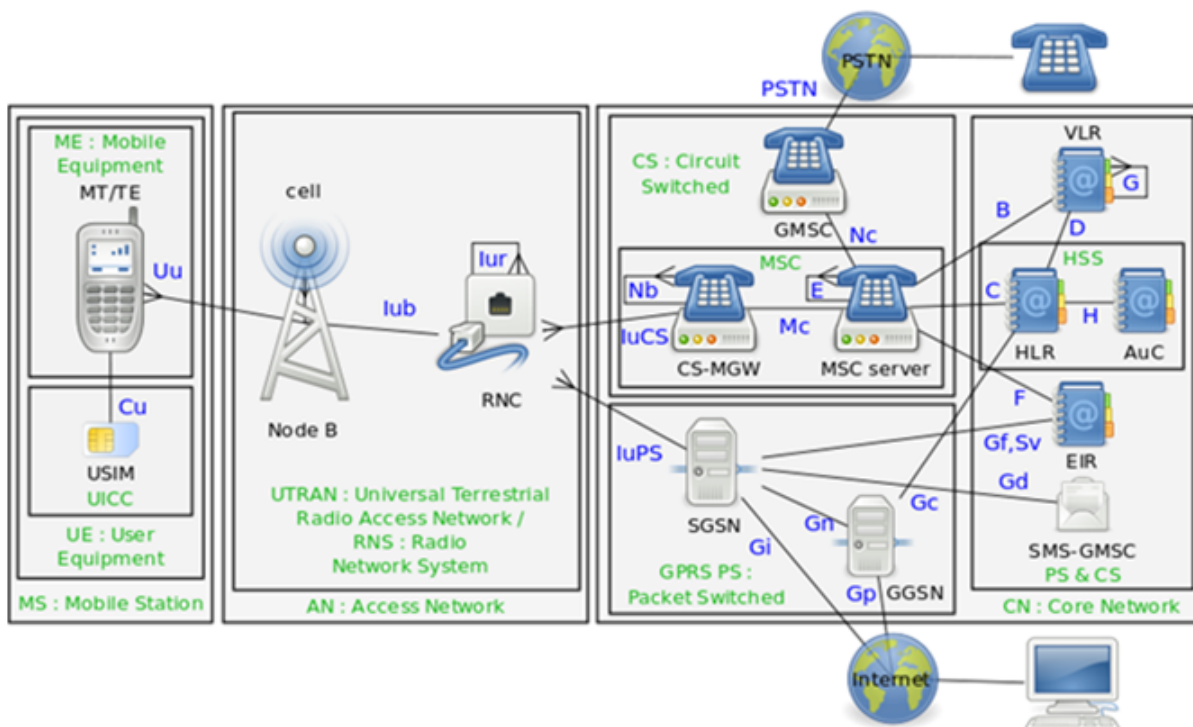


FIGURE 1.11 – Architecture du réseau UMTS.

### B-2.1. Le RNS (Radio Network Sub-system)

C'est un sous-réseau constitué d'un seul RNC et de plusieurs Node B, reliés entre eux par l'interface *Iub* et deux RNS reliés par l'interface *Iur*. Le RNS est connecté au réseau cœur par l'interface *Iu*.

- a. **Le Node B** : correspond à une BTS dans GSM. Il assure la communication radio entre équipements usagers et l'UTRAN, gère une ou plusieurs cellules, s'occupe de l'entrelacement, du codage et de décodage, de l'adaptation du débit, etc. [19]
- b. **Le RNC (Radio Network Controller)** : responsable de la gestion des canaux radios et des handovers. Il gère les mécanismes de contrôle de puissance dans les deux directions montantes et descendantes et gère aussi les fonctions du contrôle d'admission. Le RNC commande un ou plusieurs Node-B via l'interface *Iub* [37].

### B-3. Le réseau cœur (Core Network)

Le réseau cœur (CN) est semblable à celui du GPRS. Il regroupe l'ensemble des équipements assurant les fonctions telles que le contrôle d'appels, le contrôle de la sécurité et la gestion de l'interface avec les réseaux externes. Ces équipements se scindent en deux domaines (voir la figure 1.11) [22] :

- Le domaine à commutation de circuits CS (Circuit Switched domain, Réseau Numérique à Intégration de Service RNIS) composé de commutateurs circuits (MSC), de passerelles vers les réseaux téléphoniques publics et de serveurs dédiés aux SMS.
- Le domaine à commutation de paquets PS (Packet Switched domain, Réseau Internet), composé par des commutateurs paquets (SGSN et GGSN) qui relie le réseau opérateur au monde extérieur. Entre les SGSN et les GGSN, existe un réseau paquet quelconque (le plus souvent un réseau IP).

Pour gérer les données relatives aux utilisateurs (position dans le réseau, abonnement, etc.), on retrouve les bases de données qui avaient été introduites dans le GSM : HLR (Home Location Register), VLR (Visitor Location Register) et EIR (Equipment Identity Register).

#### 1.4.3.2 La 3,5 : HSDPA

Le HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) est un protocole qui offre des performances dix fois supérieures à la 3G (UMTS). C'est essentiellement une évolution logicielle qui permet cette augmentation de débit. HSDPA est basée sur la W-CDMA. Cette nouvelle technologie offre des débits pouvant aller au-delà de 10 Mbps sur le lien descendant. En plus de l'UMTS, HSDPA présente de nouveaux canaux. Pour la voie descendante, tel que le canal de transport de données à très haut débit HS-DSCH (High Speed Dedicated Shared CHannel) qui est partagé entre les utilisateurs. En plus, Le HSDPA utilise un mécanisme de retransmission hybride HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) qui permet de limiter et corriger les erreurs de transmission. Le HSDPA utilise l'AMC (Adaptive Modulation and Coding) qui désigne l'adaptation dynamique du schéma de codage en fonction des conditions radios. En UMTS, l'établissement de la transmission par paquet se fait à partir du RNC, tandis qu'en HSDPA, elle se fait à partir du Node B. Cela permet de réagir beaucoup plus rapidement, notamment grâce à un TTI (Transmission Time Interval) plus court. Le HSDPA peut être installé et déployé sans changer radicalement l'architecture de l'UMTS. Il permet du coup aux opérateurs de réaliser cette évolution à moindre coût [6], [22].

### 1.4.3.3 La 3,75 G : HSUPA

Le HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) est considéré comme le successeur du HSDPA. Il apporte des améliorations de type HSDPA au flux ascendant des connexions et permet ainsi d'obtenir des débits de chargement (Upload) pouvant atteindre les 5,8 Mbps. Le HSUPA utilise un canal montant amélioré nommé E-DCH (Enhanced Dedicated Channel), qui utilise les mêmes ingrédients que le HSDPA, mais sur le canal descendant : adaptation des communications entre les terminaux et le Node B pour optimiser l'utilisation globale du canal. L'intérêt de cette technologie sera d'offrir la possibilité d'émettre vers d'autres mobiles toutes sortes de documents électroniques (images, vidéos, etc.) favorisant ainsi le développement de l'internet haut débit mobile [6], [22].

### 1.4.4 La quatrième génération (4G)

La 4G a été définie en 2007, en juin pour la version américaine et en septembre pour la version européenne, encore dénommée LTE (Long Term Evolution). La 4G commence à émerger, elle permet des débits beaucoup plus élevés pouvant aller jusqu'à 100 Mbit/s. La migration progressive vers la 4G se fera à un coût inférieur à celui qu'ont nécessité les générations précédentes, puisqu'elle implique davantage de modifications logicielles que matérielles. Les terminaux de cette technologie devront donc être capables de détecter tous les réseaux qui sont autour d'eux et de choisir pour chacune de leurs applications le meilleur réseau à utiliser. L'objectif ici, est de fournir aux utilisateurs mobiles des services rapides et sans interruption dans un environnement hybride. Les internautes (utilisateurs de smart phones) pourront : envoyer des fichiers lourds sans problème depuis leur portable, se connecter plus rapidement au Web et y naviguer sur internet en mode accéléré, en plus de pouvoir visionner des vidéos en HD, envoyer des courriers avec des pièces jointes, télécharger des films, etc [6], [29].

#### 1.4.4.1 LTE

Le LTE (Long Term Evolution) est une évolution des familles GSM/UMTS qui spécifie la prochaine génération du système d'accès mobile à large bande dans le contexte de la 4G, laquelle utilise la technologie OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) sur la voie descendante et la technologie SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) sur la voie montante. LTE supporte des débits descendants pouvant atteindre 100 Mbits/s et des débits montants de 50 Mbits/s avec une très faible latence (10 ms) et fait appel à la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output). LTE est un système universel permettant notamment, grâce aux largeurs de bande de 1,25 à 20 MHz et en utilisant à la fois les modes de fonctionnement **FDD** (Frequency Division Duplex) et **TDD** (Time Division Duplex), d'offrir la souplesse nécessaire pour répondre aux futurs besoins des opérateurs et aux attributions de fréquences au niveau mondial. De ce fait, il offre une large accessibilité de couverture (100 km en zone rurale). Cette technologie prend en charge la mobilité des utilisateurs en exécutant le handover à une vitesse allant jusqu'à 350 km/h [31].

En réalité, l'ensemble de ce réseau s'appelle EPS (Evolved Packet System), et il est composé des deux parties : le réseau évolué d'accès radio LTE, et le réseau cœur évolué appelé SAE (System Architecture Evolution). En comparant avec les normes 2G et 3G, l'architecture de l'EPS est plus simple. En particulier, la nouvelle entité eNodeB (responsable de la transmission et de la réception radio avec l'UE) remplace les fonctions des deux composants Node B et RNC définis dans la 3G. Contrairement aux normes 2G et 3G qui proposent deux domaines de

commutation de circuit et de paquet, SAE ne propose qu'un seul domaine paquet fondé sur l'IP et appelé EPC (Evolved Packet Core) [31].

### 1.4.5 Comparaison des différentes générations

Dans ce qui suit, nous présentons un tableau comparatif des différentes générations des réseaux mobiles cellulaires.

Génération	Standard	Caractéristiques	Débit
1G	ETACS	Analogique, permet téléphonie sans fils, voix uniquement.	...
2G	GSM	Permet le transfert de la voix ou des données numériques de faible volume.	9,6 Kbit/s.
2.75G	EDGE	Permet le transfert simultané de la voix et des données numériques.	43,2 - 345,6 Kbit/s.
3G	UMTS	Permet le transfert simultané de voix et de données numériques à haut débit.	2 Mbit/s.
3.5G	HSDPA	Un dérivé de l'UMTS permet d'atteindre des débits supérieurs dans la voie descendante en mode paquet (2 Mbit/s).	10 Mbit/s (Download) jusqu'à 320 kbit/s (Upload).
3.75G	HSUPA	Une variante de HSUPA sur la voie montante.	jusqu'à 5,8 Mbit/s (Upload).
4G	LTE	Permettra d'améliorer des applications plus exigeantes telles que la télévision interactive, les blogs vidéo mobiles, les jeux avancés.	débits en liaison descendante d'au moins 100 Mbit/s.

TABLE 1.2 – Tableau récapitulatif de l'évolution des différentes générations des réseaux mobiles cellulaires.

## 1.5 Small Cell Wireless Networks (SCNs)

Récemment, il y a eu une hausse massive du trafic dans les réseaux mobiles cellulaires à cause de : l'explosion du nombre d'abonnés, la demande sans cesse croissante de débit plus élevé et l'apparition des applications multimédias. Les architectures actuelles des réseaux cellulaires ne sont plus capables de gérer de façon satisfaisante ce trafic. Les réseaux de petites cellules ou les réseaux micro-cellulaires *SCNs* (*Small Cell wireless Networks*), caractérisés par un déploiement dense de stations de bases, une auto-organisation, une efficacité en terme d'énergie, un faible coût et une faible puissance d'émission apparaît comme une solution prometteuse à ce problème. Les *SCNs* concernent une large variété de types de cellules, tels que les *micro-cellules*, les *pico-cellules* et les *femto-cellules*. Pour simplifier, une *small cell* représente un nouveau paradigme de gestion des réseaux cellulaires, basée sur l'idée de diviser la macro-cellule en des cellules plus petites qui sont servies par une station de base à basse puissance (peut être portable) qui couvre une petite zone ayant un rayon allant de 10 à 200 mètres, avec un trafic dense. Par conséquent, le choix de la taille du rayon de la cellule est un compromis entre la capacité, la complexité et le coût des équipements. Donc, le déploiement d'une *small cell* peuvent être très bénéfique dans par exemple : un centre commercial, le siège d'une entreprise, des secteurs résidentiels très

denses, un hôtel, ou dans une station de train. Le concept de *small cell* est utilisé et présent dans presque toutes les technologies de réseaux mobiles cellulaires tel que : *GSM*, *UMTS*, *LTE* et *WIMAX* [24], [25].

L'objectif principal des *SCNs* est l'augmentation de la capacité du réseau, l'amélioration de sa couverture et la réduction de la consommation énergétique du réseau. La réutilisation efficace de la bande radio (petite taille des cellules) et la possibilité de fournir une bande riche en ressources, représentent les avantages les plus attrayants de l'utilisation du concept du *small cell* (micro-cellulaire). En revanche, les *SCNs* posent des défis importants et présentent deux inconvénients majeurs : le premier est la congestion locale, ainsi la gestion de la congestion doit être réalisée dans chaque *small cell*, et l'autre est la fréquence des handovers à cause de la petite taille des cellules [26], [27].

## 1.6 La gestion de la mobilité dans les réseaux mobiles cellulaires

La gestion de la mobilité a pour objectif de permettre aux usagers de se déplacer librement dans le réseau mobile cellulaire tout en restant connectés et en évitant les désagréments que la mobilité peut engendrer. La gestion de la mobilité regroupe en général deux fonctionnalités de base : la gestion de l'itinérance (roaming) et la gestion des transferts inter-cellulaires (handover).

### 1.6.1 La gestion de l'itinérance (roaming)

L'itinérance englobe toutes les fonctions du réseau mobile cellulaire permettant de localiser géographiquement un abonné à n'importe quel instant et d'assurer une bonne qualité de communication à cet endroit. Cette procédure joue un rôle très important puisqu'elle permet d'acheminer les communications de/vers un usager du réseau quel que soit l'endroit où il se trouve (connaître en permanence la zone dans laquelle se trouve le mobile). Pour mener à bien cette gestion, les bases de données HLR (tient à jour les données de l'abonné) et VLR (gère le client dans la cellule où il se trouve) sont généralement utilisées [28].

### 1.6.2 La gestion du transfert inter-cellulaire (handover)

Un des grands challenges pour les réseaux mobiles cellulaires est la mobilité des usagers durant une même communication (changement de cellules). En effet, la disponibilité des ressources radios durant toute la durée de la communication n'est pas nécessairement garantie, et ces utilisateurs peuvent subir une dégradation ou même une rupture de la communication lors d'un passage d'une cellule à une autre. Cet événement, appelé *transfert inter-cellulaire* ou (*handoff* ou *handover*), doit être transparent à l'utilisateur [5].

La section suivante, présente en détail le concept du handover.

## 1.7 Le transfert inter-cellulaire : handover

Le handover est le processus par lequel une communication est maintenue lors du déplacement du mobile dans le réseau mobile cellulaire. Ce maintien est possible grâce au changement du canal radio utilisé. Le nouveau canal peut être dans la même cellule, on parle alors d'un handover intracellulaire, ou vers une nouvelle cellule, c'est le handover intercellulaire [29]. Chaque opération de handover nécessite des ressources réseau pour rediriger l'appel vers la nouvelle station de base (SB). La Figure 1.12 illustre un scénario de transfert inter-cellulaire, dans lequel

une SM est connectée à une SB1, et se déplace vers la SB2 pendant son appel. Le handover sera effectué dans la zone de chevauchement (*zone de handover*) entre les deux SBs où la SM peut recevoir le signal à partir des deux SBs. La SM mesure d'une façon continue et périodique la puissance du signal de la SB1 et de la SB2. Si la puissance du signal de la SB2 est meilleure que celle de la SB1 avec un certain montant fixe appelé *seuil de handover* (*the handover threshold*), une décision de handover sera prise. Et si la SB2 accepte de fournir les ressources nécessaires pour accueillir la SM, alors la SM peut désormais être connectée à la SB2. Dans le cas où, la nouvelle SB2 ne peut pas fournir les ressources nécessaires à la connexion de la SM, le handover est refusé et la connexion est interrompue [30].

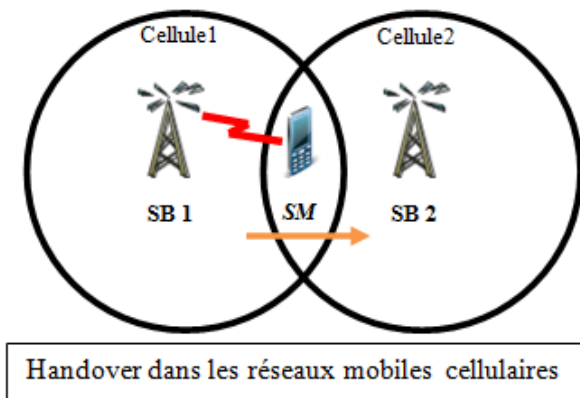


FIGURE 1.12 – Le transfert intercellulaire dans les réseaux mobiles cellulaires.

### 1.7.1 Nécessité du handover

Il existe trois cas principaux où le déclenchement de l'exécution d'un handover est nécessaire [31] :

1. Lorsque la station mobile quitte une cellule pour une autre.
2. Une indisponibilité signalée par la station de service, soit parce qu'elle est tombée en panne, ou qu'elle est trop chargée par d'autres mobiles en communication, ou bien encore que le signal d'une autre station de service devient meilleur que le sien. Dans l'un de ces cas, s'il existe d'autres stations de service voisines disponibles, le handover sera établi.
3. Beaucoup d'interférences entre les stations mobiles dans une même cellule. Dans ce cas, un mobile décide de changer de cellule pour subir moins d'interférences.

### 1.7.2 Phases du handover

Le mécanisme de handover peut être divisé en trois phases [32] :

1. **Prise de mesure et supervision du lien (la découverte)** : Durant la communication, la station de base et le terminal mobile effectuent des mesures (scans) sur la qualité du lien radio (la puissance du signal et le taux d'erreur par bit). Les intervalles de mesure doivent être suffisamment petits pour permettre au réseau de réagir rapidement à la détérioration de la qualité du lien. Pendant cette phase, une liste de cellules candidates, susceptibles de prendre en charge la communication, est maintenue à jour.
2. **Initiation de la procédure de handover (la décision)** : En se basant sur l'étape précédente, le processus de handover est enclenché dès lors que la qualité du signal est au-dessous d'un seuil prédéterminé par exemple. La phase de décision du handover choisira

les ressources de cible. L'initiation de ce mécanisme peut être faite par le réseau, ou bien par le mobile lui-même.

3. **Exécution du handover** : Dans l'exécution du handover, des nouveaux raccordements sont établis et des anciens raccordements sont libérés en effectuant des échanges de signalisation entre le terminal mobile et le réseau. Donc, il ne reste au système qu'à informer le mobile et la nouvelle station de base de la nouvelle configuration. Ce mécanisme doit être rapide et fiable, de façon à ne pas perdre les données.

### 1.7.3 Classification du handover

Dans la littérature, le handover peut être classifié selon différents critères, nous présentons dans cette section un regroupement [33],[14] :

#### 1.7.3.1 Classification selon le mode du transfert de lien

Trois cas [31], [34] peuvent être distingués selon que l'ancien lien est libéré avant (*Hard handover*), pendant (*Seamless handover*) ou après (*Soft handover*) l'établissement du nouveau lien.

- a. **Hard handover** : Ce mécanisme oblige la SM à interrompre la connexion avec l'ancienne station de base avant d'établir la connexion avec la nouvelle station de base (mécanisme *Break Before Make*). Dans ce cas, le mobile ne peut communiquer qu'avec une seule station de base au cours d'une communication. Ce mécanisme provoque une légère interruption de service au cours du handover. Il est généralement utilisé dans les systèmes à base de FDMA et TDMA comme le cas de GSM, où une SM peut se connecter au plus à une station de base à la fois [31].

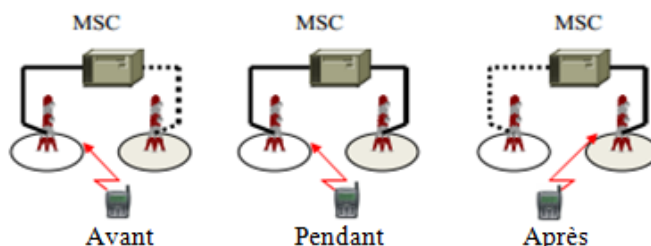


FIGURE 1.13 – Le Hard Handover.

- b. **Seamless handover** : Dans ce type de handover qui est considéré comme une variante du hard handover, la nouvelle liaison est établie en parallèle avec l'ancienne. Pendant le handover, seul l'ancien lien est actif, à la fin du handover le nouveau flux de données est activé, i.e. l'ancien lien est libéré pendant l'établissement du nouveau lien avec la nouvelle station de base.

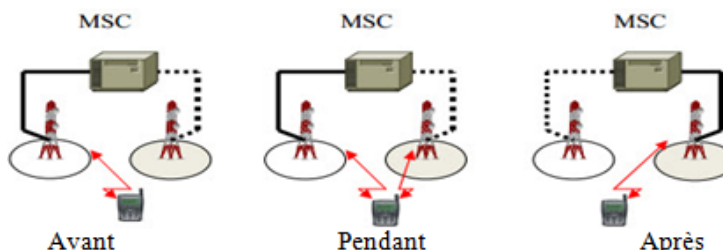


FIGURE 1.14 – Le Seamless handover.

- c. **Soft handover** : À l'approche de la périphérie d'une cellule, les couvertures de deux SBs voisines se chevauchent, et la SM distingue deux signaux forts. Si elle se connecte aux deux stations d'accès à la fois, on dit qu'elle exécute un *soft handover*. Dans ce cas, La SM peut donc se connectée simultanément à deux SBs ou plus appartenant à une liste de SBs (Actif Set) maintenue par la SM avant d'interrompre la connexion avec l'ancienne SB (mécanisme *Make Before Break*), autrement dit, l'ancien lien est libéré après l'établissement du nouveau lien avec la SB cible. Durant ce type de handover, le passage d'une cellule à une autre est confortable pour l'abonné. Ce type de handover a été introduit dans le système CDMA.

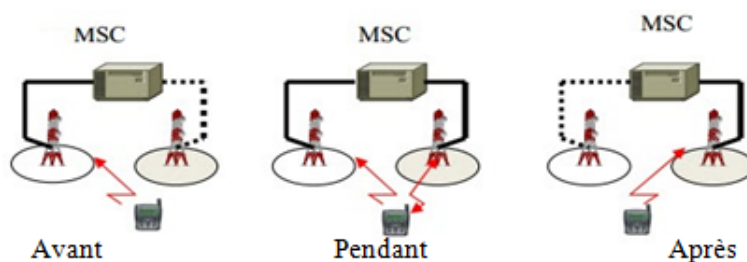


FIGURE 1.15 – Le Soft handover.

Une variante du soft handover est le *softer handover* où le mobile se trouve dans une zone de couverture commune à deux secteurs adjacents d'une même station de base.

### 1.7.3.2 Classification selon le type de la technologie sans fil

On peut classifier le handover en trois types [31] :

- **Handover horizontal** (intra-technologie) : entre deux cellules gérées par la même technologie (par exemple entre deux cellules UMTS).
- **Handover vertical** (inter-technologie) : entre deux cellules gérées par différentes technologies (par exemple entre WiMAX et UMTS).
- **Handover diagonal** : entre deux cellules gérées par deux technologies proposées par le même organisme (par exemple entre IEEE 802.11 et IEEE 802.16 ou encore entre 3GPP-UMTS et 3GPP-HSDPA).

### 1.7.3.3 Classification selon la portée de la mobilité :

Cette classification est basée sur la position de l'ancien et le nouveau point d'attachement dans un réseau.

- **Handover intera-domaine (Micro-mobilité)** : Entre deux cellules du même domaine.
- **Handover inter-domaine (Macro-mobilité)** : Entre deux cellules de domaines différents.

### 1.7.3.4 Classification selon les couches du modèle OSI :

Cette classification est donc basée sur la position du protocole de mobilité dans le modèle OSI. Il existe des protocoles de la mobilité de niveau 3+ du modèle OSI (MSCTP, SIP), situés dans les couches : 3.5, 4, 5 respectivement. Il existe une autre catégorie de protocoles de mobilité dite : les protocoles inter-couches (cross layer handover), comme le Fast Mobile IPv6 situé dans la couche 2.5, ou le protocole HIP situé dans la couche 3.5.

### 1.7.3.5 Classification selon le niveau de contrôle du handover

Il y a quatre méthodes de contrôle du handover [35] :

1. **Mobile Controlled handover (MCHO)** : Le terminal mobile mesure la puissance du signal dans le sens descendant ainsi que la puissance des signaux en provenance des cellules adjacentes. Compte tenu des mesures effectuées, le mobile décide d'effectuer le handover à la SB estimée comme étant la meilleure candidate pour le handover.
2. **Network Controlled Handover (NCHO)** : Le réseau mesure périodiquement la puissance du signal dans le sens montant et en fonction initie le processus du handover.
3. **Mobile Assisted Handover (MAHO)** : Dans ce cas, le réseau et le mobile effectuent conjointement des mesures des liaisons radios dans le sens montant et descendant. Les mesures effectuées sur la liaison descendante par le terminal mobile sont envoyées périodiquement au réseau. Dans ce cas, la décision du handover est prise par le réseau. Cette décision est basée sur les mesures effectuées sur les liaisons descendante et montante.
4. **Network Assisted Handover (NAHO)** : Avec cette stratégie, la décision d'initiation du handover est prise par le terminal mobile. Cette décision est basée sur les mesures des liaisons dans les sens montant et descendant. Le réseau informe le terminal mobile des mesures effectuées sur le sens montant. Ainsi, le mobile effectue la décision du handover avec l'aide du réseau.

### 1.7.4 Les mesures de performance de la procédure de handover

Les principales mesures de performance pour les appels de handovers sont [36] :

- **La probabilité de blocage d'un nouvel appel** : La probabilité qu'une première tentative d'appel soit bloquée.
- **La probabilité de blocage d'un appel de handover** : La probabilité qu'une tentative d'appel de handover soit bloquée.
- **La probabilité de handover** : La probabilité qu'un appel en cours de communication avec une cellule particulière, demande d'effectuer un handover avant la fin de son appel. Cette métrique représente le nombre moyen de handovers par cellule.
- **La probabilité d'échec d'un handover** : la probabilité qu'un appel de handover se termine de force faute d'un échec de handover.
- **Durée de déroulement du handover (Délai)** : représente la période entre la décision de déclencher le handover et l'établissement d'un lien fiable avec la SB cible.
- **Durée de l'interruption** : La durée du temps de handover pour laquelle le terminal mobile n'est en communication avec aucune station de base.
- **Nombre de tentatives de handover** : il s'agit du nombre d'essais de connexion entre le mobile et une nouvelle SB avant l'établissement d'un lien fiable.
- **Taux de handover** : Le nombre de handover par unité de temps.

## 1.8 Schémas d'allocation de canaux

Il existe trois grandes familles de schémas d'allocation de ressources (canaux) :

1. **Allocation fixe des canaux FCA (Fixed Channel Assignment)** : FCA est une méthode adaptée aux systèmes cellulaires utilisant *FDMA* et *TDMA*. FCA consiste à une allocation fixe de canaux aux stations de base lors de la planification du réseau et le même canal peut être utilisé par une autre cellule suffisamment loin pour ne pas causer d'interférence *co-canal* [5], [6].

2. **Allocation dynamique des canaux DCA (Dynamic Channel Assignment)** : Dans DCA, tous les canaux, ou un ensemble de canaux, disponibles dans le système sont mis dans un groupe (pool) commun utilisable par toutes les stations de base. Lors d'une demande de communication, une cellule choisit sans causer d'interférences un canal du pool commun qui sera restitué à la fin de l'appel [5], [6].
3. **Allocation hybride des canaux HCA (Hybrid Channel Assignment)** : HCA combine les deux techniques précédentes. Dans HCA, les canaux sont divisés en deux catégories : fixe et dynamique. À chaque cellule est attribué un ensemble de canaux permanents et le reste est mis dans un pool commun, auquel toutes les stations de base peuvent accéder lorsque leur ensemble fixe est complètement alloué [5],[6].

## 1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts de base des réseaux mobiles cellulaires. Nous avons entamé ensuite la description de l'évolution des différentes générations de ces réseaux. Suite à cela, nous avons détaillé le concept de handover.

L'un des soucis majeurs lors de la conception des réseaux cellulaires est la gestion de la mobilité et surtout les transferts inter-cellulaire. Cela consiste à éviter aux abonnés le désagrément causé par des coupures de communication lors de leur déplacement. En effet, du point de vue de l'abonné, cette coupure de communication est beaucoup plus désagréable qu'un échec de connexion. Comme l'échec du handover est moins souhaitable que le rejet d'une nouvelle connexion, l'attribution des canaux de communication peut être faite en considérant la priorité des requêtes de handover sur les nouvelles requêtes ou non. Dans le premier cas, une priorité élevée est réservée au handover, par rapport aux nouveaux appels en appliquant l'une des méthodes suivantes [34] :

- Les canaux gardiens.
- La mise en file d'attente de requête de handover.

Les différentes techniques utilisées pour favoriser les handover sont détaillées dans le troisième chapitre.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter le formalisme des réseaux de Petri stochastiques généralisés qui permet de modéliser, étudier et analyser les réseaux cellulaires.

## CHAPITRE 2

# LES RÉSEAUX DE PETRI STOCHASTIQUES GÉNÉRALISÉS (RDPSG).

### 2.1 Introduction

Les Réseaux de Petri (*RDP*) sont un outil graphique et mathématique pour la modélisation de divers systèmes où les notions d'événements et d'évolutions simultanées sont importantes. Historiquement, le concept de *RDP* trouve ses origines dans la thèse de doctorat de *Carl Adam Petri* [38] présentée en 1962 [39]. Depuis leur apparition, les réseaux de Petri n'ont cessé d'évoluer : d'un simple moyen pour l'analyse structurelle des systèmes de communications, à un outil puissant dans la description, la modélisation et l'étude formelle de beaucoup de systèmes distribués et concurrents. Ils sont considérés comme un outil prometteur pour décrire et étudier les systèmes qui se caractérisent comme étant concurrents, asynchrones, distribués, parallèles, non déterministes, avec partage de ressources, et/ou stochastiques, tels que les systèmes manufacturiers, les systèmes de télécommunication, les systèmes informatiques, les commandes des ateliers de fabrication, etc.

Cependant, l'étude des caractéristiques des systèmes seuls ne suffit pas pour s'assurer qu'un système fonctionne d'une manière correcte. Le besoin d'enrichir le modèle de base des *RDPs* par une spécification temporelle se fit sentir par les chercheurs quelques temps plus tard. Par conséquent, *les réseaux de Petri temporisés* ont été proposés par *C. Ramchandani* [40] qui affecte à chaque transition une durée fixe. Par contre, dans la pratique, il existe peu de cas où les durées associées aux événements sont déterministes (fixes), la plupart des systèmes réels sont non-déterministes avec des délais de temps aléatoires. Pour cela, *Florin et al.* ont proposé une nouvelle extension des *RDP* intitulée : *réseaux de Petri stochastiques (RDPS)* [41], dans lesquels les délais de franchissements associés aux transitions sont des variables aléatoires.

Cependant, la plupart des systèmes pratiques comportent des opérations qui nécessitent un temps aléatoire pour s'exécuter, et d'autres qui surgissent instantanément, comme c'est le cas des opérations d'allocation de ressources, de synchronisation, ou bien des opérations purement logiques. Il est clair qu'un *RDPS* ne peut modéliser de telles situations. Pour palier à ce problème, une autre classe de réseaux de Petri est apparue sous le nom de réseaux de Petri stochastiques généralisés (*RDPSG*) [42]. Les *RDPSG* constituent un outil puissant pour la modélisation des systèmes parallèles et distribués. Durant les deux dernières décennies, les *RDPSG* ont été largement appliqués à la modélisation des réseaux informatiques [43], des réseaux de mobiles cellulaires

[55], des systèmes de communication, de production, etc.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les concepts de base des réseaux de Petri, des réseaux de Petri stochastiques et des réseaux de Petri stochastiques généralisés. Aussi, nous donnons quelques rappels concis sur la théorie des probabilités, notamment les processus stochastiques et les chaînes de Markov.

## 2.2 Les concepts de bases de réseaux de Petri (RDP)

### 2.2.1 Définition informelle

Un *réseau de Petri (RDP)* est un graphe biparti orienté dont les arcs sont valués, décrivant les relations entre des conditions et des événements. Il est constitué d'un ensemble de places représentées par des cercles, un ensemble de transitions représentées par des barres et un ensemble d'arcs représentés par des flèches. Une distribution de jetons (marques) dans les places décrit le fonctionnement des activités en évoluant de place en place suivant des règles précises.

L'évolution du système est causée par le déclenchement des événements (transitions) changeant ainsi les états des composantes ou ressources (places). Un *RDP* a donc deux types de nœuds [39] :

1. **Les places** : représentent l'état du système (les conditions), noté graphiquement par des cercles. Chaque place contient un nombre entier (positif ou nul) de marques (ou jetons). Ces derniers sont représentés par des points noirs.
2. **Les transitions** : représentent les événements, notés graphiquement par un rectangle ou une barre. Une transition qui n'a pas de place en entrée est appelée transition *source* et une transition qui n'a pas de place en sortie est appelée transition *puits*.

Les places et les transitions sont reliées par des arcs orientés et étiquetés où :

- Un arc relie, soit une place à une transition, soit une transition à une place mais jamais une place à une place ou une transition à une transition.
- Chaque arc est étiqueté par une valeur (ou un *poids*), qui est un nombre entier positif. Un arc qui n'a pas d'étiquette est un arc dont le poids est par défaut égal à 1.

Voici un exemple de réseau de Petri :

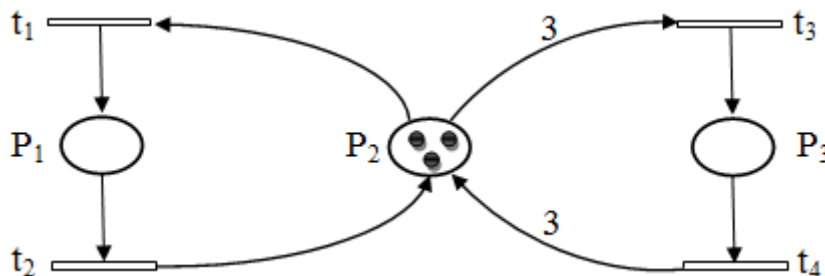


FIGURE 2.1 – Exemple d'un réseau de Petri.

## 2.2.2 Définition formelle

### 2.2.2.1 Définition d'un réseau de Petri

Un réseau de Petri  $R$  est un quadruplet  $R = (P, T, Pré, Post)$  avec [55], [46] :

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  est un ensemble fini non vide de places ;
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  est un ensemble fini non vide de transitions, disjoint de  $P$  ;
- $Pré : P \times T \rightarrow IN$  : une application d'incidence avant, tel que  $Pré(p, t)$  contient la valeur entière associée à l'arc allant de la place  $p$  à la transition  $t$  ;
- $Post : T \times P \rightarrow IN$  : est l'application d'incidence arrière, tel que  $Post(p, t)$  contient la valeur entière associée à l'arc allant de la transition  $t$  à la place  $P$ .

#### Remarque

- $P \cap T = \emptyset$  et  $P \cup T \neq \emptyset$ .
- Lorsque  $Pré$  et  $Post$  prennent leurs valeurs dans la paire  $\{0, 1\}$ , le réseau de Petri est dit *ordinaire*.

#### Notation

- On notera  ${}^0t$  (respectivement  ${}^0t$ ) l'ensemble  $\{p \in P / Pré(p, t) \neq 0\}$  (*resp.*  $\{p \in P / Post(p, t) \neq 0\}$ ) correspondant à l'ensemble des places d'*entrée* (*resp.* *sortie*) de la transition  $t$ .
- On notera  $p^0$  (respectivement  ${}^0p$ ) l'ensemble  $\{t \in T / Post(p, t) \neq 0\}$  (*resp.*  $\{t \in T / Pré(p, t) \neq 0\}$ ) correspondant à l'ensemble des transitions d'*entrée* (*resp.* *sortie*) de la place  $p$ .
- $m = card(P)$  : le nombre de places du *RDP*.
- $n = card(T)$  : le nombre de transitions du *RDP*.

### 2.2.2.2 Définition d'un réseau de Petri marqué [46], [47]

Un réseau de Petri *marqué* se définit par un couple  $(R, M)$  dans lequel  $R$  est un réseau de Petri et  $M : P \rightarrow IN$  une application appelée *marquage*.

Le symbole  $M$  définit le marquage du réseau de Petri et  $M(p)$  indique le marquage de la place  $p$  (le nombre de jetons contenus dans  $p$ ). Une place peut contenir 0 ou  $n$  jetons. Graphiquement, les marques sont représentées par des points ou des nombres à l'intérieur des places. Les jetons vont circuler dans les places selon certaines règles. Cette circulation symbolise *l'évolution dynamique* du système. Un marquage est dénoté par un vecteur contenant le nombre de jetons dans chaque place.

Le marquage initial, noté  $M_0$ , donne la valeur initiale du nombre de jetons dans toutes les places, et précise donc l'état global initial du système considéré. Par définition, l'état initial correspond à une distribution des jetons à un moment initial (le début de l'étude).

Le réseau de Petri représenté par la figure 2.2(a) est un réseau de Petri non marqué alors que le réseau de Petri représenté par la figure 2.2(b) est un réseau de Petri marqué et le marquage correspondant est :  $M = (1, 1, 0, 0, 2)$ .

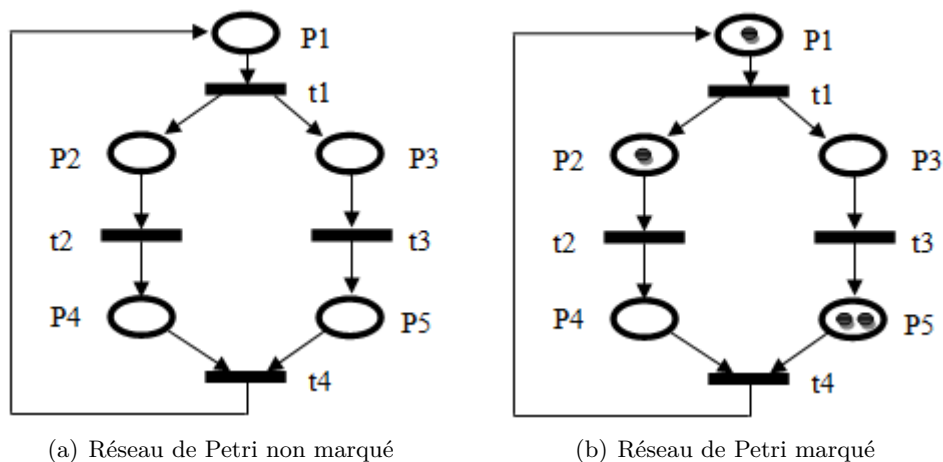


FIGURE 2.2 – Exemple de réseau de Petri marqué.

### 2.2.3 Représentation d'un RDP

Il existe deux manières différentes pour représenter un réseau de Petri :

#### 2.2.3.1 Représentation graphique

L'un des aspects les plus agréables des réseaux de Petri est qu'ils disposent d'une représentation graphique attrayante, qui accroît la lisibilité et facilite la compréhension des modèles. En effet, on peut représenter un *RDP* comme un graphe orienté biparti constitué de deux types de sommets les places et les transitions, reliés entre eux par des arcs [48]. Pour plus de détails, (Voir la section 2.2.2).

#### 2.2.4 Représentation matricielle

Dans cette représentation, le marquage  $M$  peut être représenté par un vecteur, et les applications *Pré* et *Post* par des matrices de dimensions  $(M \times N)$ , dont les lignes sont indicées par les  $n$  numéros de places et les colonnes par les  $m$  numéros de transitions [49] :

- La *matrice d'incidence arrière* notée  $C^+$ , définit les relations entre les transitions et les places tel que :  $C^+(p, t) = Post(p, t)$ .
- La *matrice d'incidence avant* notée  $C^-$ , définit les relations entre les places et les transitions tel que :  $C^-(p, t) = Pré(p, t)$ .
- On note  $Pré(., t)$  et  $Post(., t)$  les colonnes de ces matrices associées à une transition  $t$ .
- On note  $Pré(p, .)$  et  $Post(p, .)$  les lignes associées à une place  $p$ .

Ces deux matrices peuvent être synthétisées en une seule matrice, dite *matrice d'incidence* définie par :  $C = C^+ - C^-$ , ou encore :

$$\forall p \in P, \forall t \in T : C(p, t) = Post(p, t) - Pré(p, t).$$

### 2.2.5 Évolution d'un réseau de Petri

À partir d'un marquage initial, un réseau de Petri peut évoluer. L'évolution d'un RDP correspond à l'évolution de son marquage au fil du temps ce qui représente l'évolution de l'état du système. Ainsi, les jetons qui matérialisent l'état du réseau à un instant donné, peuvent passer d'une place à l'autre par franchissement ou tir d'une transition  $t$  selon des règles de franchissement [47].

Dans les réseaux de Petri, le comportement pourra évoluer lorsque toutes les places d'entrée relatives à une transition contiendront un nombre suffisant de jetons : la transition sera alors franchissable (sensibilisée ou tirable). Lorsqu'elle sera franchie (ou tirée), son franchissement (ou tir) définira le marquage suivant du réseau [50].

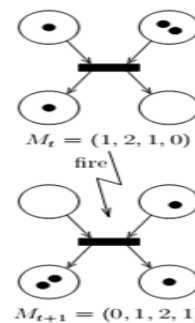


FIGURE 2.3 – Exemple d'évolution d'un RDP.

Ainsi, la règle d'évolution des réseaux marqués leur donne une dynamique, tout en précisant comment les transitions permettent de modifier l'état du système [50].

#### 2.2.5.1 Règle de Franchissement [51], [50]

Une transition  $t$  est dite *franchissable* (tirable ou sensibilisée) dans un marquage  $M$  si et seulement si :  $\forall p \in P, M(p) \succeq Pré(p, t)$ .

La condition de tir, liée à  $Pré(p, t)$ , explicite le fait que, pour toutes les places  $p$  d'entrée de  $t$  (les places dont les arcs sortant les joignent à  $t$ ), le nombre de jetons dans  $p$ , soit  $M(p)$ , doit être supérieur ou égal au poids de l'arc allant de  $p$  à  $t$ , soit  $Pré(p, t)$ .

- Le franchissement de la transition  $t$  pour le marquage  $M$  se note  $M [t \succ$ .
- Le franchissement de la transition  $t$  conduit à un nouveau marquage  $M'$ , tel que :

$$\forall p \in P, M'(p) = M(p) + Post(p, t) - Pré(p, t).$$

- On note par  $M [t \succ M'$  la relation correspondante définie dans  $IN^n \times T \times IN^n$  et on dit que  $M$  donne  $M'$  après le tir de  $t$ .
- Ainsi, la règle de tir signifie que le nouveau marquage  $M'$  sera obtenu, à partir du marquage précédent  $M$ , en supprimant d'abord, dans les places d'entrée de  $t$ , le nombre de jetons indiqué sur les arcs entrant de  $t$  ( $Pré(p, t)$ ), et en ajoutant ensuite, à chaque place de sortie  $p'$  de  $t$ , le nombre de jetons correspondant au poids indiqué sur l'arc sortant de  $t$  vers  $p'$  ( $Post(p, t)$ ).

#### 2.2.5.2 Séquence de franchissement [51]

Le franchissement successif de transitions sensibilisées dans un ordre donné à partir d'un marquage initial donné  $M_0$ , conduisant au marquage  $M_k$ , constitue une *séquence de franchissement* :  $\sigma = t_1 t_2 \dots t_k$ .

#### 2.2.5.3 Marquage accessible [46]

Un marquage  $M_n$  est dit accessible à partir de  $M_0$ , s'il existe une séquence de franchissements  $\sigma$  permettant de transformer  $M_0$  à  $M_n$ . Une séquence de franchissements est notée par :  $\sigma =$

$t_1 t_2 \cdots t_n$

Dans ce cas  $M_n$  est accessible à partir de  $M_0$  par  $\sigma$  et on écrit :  $M_0[\sigma \succ M_n$ .

#### 2.2.5.4 L'ensemble d'accessibilité

L'ensemble des marquages accessibles (ensemble d'accessibilité) d'un réseau de Petri, noté  $A(R, M_0)$ , est l'ensemble des marquages atteignables à partir du marquage initial  $M_0$  par une séquence de franchissement. Formellement :

$$A(R, M_0) = \{M \in \mathbb{N}^n \mid \exists \sigma \in T^* \text{ tel que } M_0[\sigma \succ M\}.$$

#### 2.2.5.5 Graphe d'accessibilité [46]

Soit  $(R, M_0)$  un RDP marqué. Le graphe d'accessibilité (graphe de marquages accessibles *GMA*) d'un réseau de Petri, noté  $G(R, M_0)$  qui définit entièrement la sémantique du réseau, est défini comme un graphe dont les sommets (nœuds) sont les marquages accessibles appartenant à  $A(R, M_0)$  et les arcs sont pondérés par les noms des transitions, qui définissent la relation de tir entre les marquages. Donc, un arc étiqueté par  $t$  joint  $M'$  à  $M$  si et seulement si :  $M[T \succ M'$ .

**Note :** Le graphe des marquages accessibles n'est pas nécessairement fini.

### 2.2.6 Concurrence et conflit entre transitions

Le phénomène de concurrence dans un système provient du fait que plusieurs évènements peuvent s'exécuter en parallèle.

#### 2.2.6.1 Transitions concurrentes (parallélisme) [52], [53]

Soit un réseau de Petri, une transition est dite *concurrente* si son franchissement n'est désactivé par le franchissement d'aucune autre transition du modèle.

- **Parallélisme structurel** : deux transitions  $t_1$  et  $t_2$  sont parallèles structurellement si elles n'ont aucune place d'entrée commune :

$$\text{Pré}(\cdot, t_1) \times \text{Pré}(\cdot, t_2) = 0.$$

- **Parallélisme effectif** : deux transitions  $t_1$  et  $t_2$  sont en parallélisme effectif, pour un marquage donné  $M$  si et seulement si elles sont parallèles structurellement et :

$$M \succeq \text{Pré}(\cdot, t_1) \text{ et } M \succeq \text{Pré}(\cdot, t_2).$$

#### 2.2.6.2 Conflit entre transitions

Un conflit correspond à un choix exclusif entre deux franchissements possibles [55].

- **Conflit structurel** : deux transitions  $t_1$  et  $t_2$  sont en conflit *structurel*, si et seulement si elles ont au moins une place commune en entrée. Autrement dit :

$$\exists p \in P : \text{Pré}(p, t_1) \times \text{Pré}(p, t_2) \neq 0.$$

- **Conflit effectif** : deux transitions  $t_1$  et  $t_2$  sont en conflit *effectif* pour un marquage  $M$  si et seulement si  $t_1$  et  $t_2$  sont en conflit *structurel* et :

$$M[t_1 \succ \text{ et } M[t_2 \succ \text{ et } \exists p \in P : M(p) < \text{Pré}(p, t_1) + \text{Pré}(p, t_2).$$

### 2.2.7 Principales propriétés usuelles des réseaux de Petri

Les réseaux de Petri exhibent deux grandes classes de propriétés : les propriétés structurelles et les propriétés dynamiques.

#### 2.2.7.1 Propriétés structurelles

Les propriétés structurelles sont indépendantes du marquage initial et sont liées à la topologie du réseau. Leur analyse repose essentiellement sur les techniques d'algèbre linéaire [54] et leur but est de bâtir une passerelle entre la structure du réseau étudié et son comportement.

Dans ce qui suit, nous allons nous limiter à présenter les propriétés comportementales, étant donné que, à travers ces dernières on peut étudier l'aspect dynamique des systèmes.

#### 2.2.7.2 Propriétés comportementales (dynamiques)

Les propriétés comportementales sont dépendantes du marquage initial et sont liées à l'évolution de ce dernier. Elles permettent la vérification des priorités qualitatives en se basant sur le graphe des marquages accessibles. Parmi ces propriétés, nous citons [39], [50], [55], [47] :

- a. **Accessibilité (atteignabilité)** : Etant donné un *RDP* marqué  $(R, M_0)$ . Le problème d'*atteignabilité* consiste à vérifier s'il existe une séquence de transitions (une évolution du système) qui transforme  $M_0$  en  $M$ .
- b. **Bornitude** : Une place  $P_i$  est *bornée* pour un marquage initial  $M_0$  si pour tout marquage atteignable à partir de  $M_0$ , le nombre de jetons dans  $P_i$  reste borné. Elle est dite *k-bornée* si le nombre de jetons dans  $P_i$  est toujours inférieur ou égal à  $k$ . Un *RDP* marqué est *K-borné* si toutes ses places sont *k-bornées*. Si  $k = 1$ , on dit que la place est *binnaire* et le *RDP* est *sauf* (*safe*). Formellement on peut écrire :

$$\exists K \in \mathbb{N} \text{ telque : } \forall M \in A(R, M_0), \forall p \in P : M(p) \leq K.$$

**Remarque** : si le *GMA* d'un *RDP* marqué est fini alors ce réseau est *borné*.

- c. **Vivacité** : Le concept de vivacité est étroitement lié à l'absence complète de l'*interblocage* dans les systèmes opérationnels.

- i. **Pseudo vivacité** : Un *RDP* marqué  $A(R, M_0)$  est *pseudo-vivant* si seulement si :

$$\forall M \in A(A, M_0), \exists t \in T \text{ telque } M[t \succ .$$

- ii. **Quasi vivacité**

- **Transition quasi-vivante**

Une transition  $t$  d'un *RDP* marqué est dite *quasi-vivante* si seulement si :

$$\exists M \in A(R, M_0) \text{ telque } M[t \succ .$$

Autrement dit, une transition  $t$  est *quasi-vivante* pour un marquage initial  $M_0$  s'il existe une séquence de franchissements qui contient  $t$  à partir de  $M_0$ .

- **Réseau quasi-vivant**

Un *RDP*  $(R, M_0)$  est *quasi-vivant* si et seulement si toutes ses transitions sont *quasi-vivantes* :

$$\forall t \in T, \exists M \in A(R, M_0) \text{ telque } M[t \succ .$$

- iii. **Vivacité**

- **Transition vivante**

Une transition  $t$  d'un *RDP* marqué  $(R, M_0)$  est dite *vivante* si seulement si :

$\forall M \in A(R, M_0)$ ,  $t$  est quasi vivante pour le réseau  $R$ .

– **Réseau vivant**

Un  $RDP (R, M_0)$  est *vivant* si et seulement si toutes ses transitions sont vivantes. Autrement dit :

$$\forall t \in T, \forall M \in A(R, M_0), \exists \sigma \in T^* \text{ telque } M[\sigma T \succ .$$

- d. **Marquage puits et blocage** : Un marquage  $M$  d'un  $RDP$  est un marquage *puits*, si aucune transition n'est franchissable depuis  $M$ . Un réseau est dit *sans blocage* si tout marquage accessible depuis  $M_0$  n'est pas un marquage "puits".
- e. **Etat d'accueil** : Un *état d'accueil* est un marquage toujours accessible quelque soit l'évolution du réseau. Il peut représenter par exemple un état stable du réseau. Un  $RDP$  admet un état d'accueil  $M_a$  pour un marquage initial  $M_0$  si seulement si :

$$\forall M \in A(R, M_0), \exists \sigma \in T^* \text{ telque } M[\sigma \succ M_a.$$

- f. **RDP réinitialisable** : Un  $RDP$  est *réinitialisable* pour un marquage initial  $M_0$ , si  $M_0$  est un état d'accueil.
- g. **Terminaison propre** : Un  $RDP$  marqué  $(R, M_0)$  est dit à *terminaison propre* si l'état d'accueil  $M_a$  est un marquage puits.
- h. **Conservation** : Cette priorité consiste à vérifier que les jetons qui représentent une ressource donnée ne sont ni créés ni détruits. Pour cela, la façon la plus simple consiste à garder le nombre de jetons dans le réseau constant. Un  $RDP (R, M_0)$  est *conservatif* si :

$$\forall M \in A(R, M_0), \sum_{p_i \in P} M(p_i) = \sum_{p_i \in P} M_0(p_i).$$

- i. **Persistence** : Un réseau de Petri  $(R, M_0)$  est dit *persistant* si pour deux transitions quelconques, le franchissement d'une transition ne doit pas inhiber l'autre transition. Si une transition dans un réseau de Petri persistant est une fois tirable, elle le reste jusqu'à son franchissement.
- j. **Couverture** : Un marquage  $M$  dans un réseau de Petri  $(R, M_0)$  est dit *couvrable* s'il existe un marquage  $M'$  dans  $(R, M_0)$  tel que  $M'(p) \geq M(p)$  pour chaque place du réseau.

### 2.2.8 Structures particulières des réseaux de Petri [46]

- Un *graphe d'état* est un  $RDP$  telle que toute transition a une place d'entrée et une place de sortie.
- Un *graphe d'événement* est un  $RDP$  telle que toute place a exactement une transition d'entrée et une transition de sortie.
- Un  $RDP$  est *pur* si le graphe du réseau ne comprend aucune boucle élémentaire, c'est-à-dire aucune transition n'ayant la même place en entrée et en sortie.
- Un  $RDP$  *simple* : C'est un  $RDP$  dans lequel chaque transition ne peut être concernée que par un conflit au plus. S'il existe une transition  $T_1$  et deux conflits  $\langle P_1, \{T_1, T_2, \dots\} \rangle$  et  $\langle P_2, \{T_1, T_3, \dots\} \rangle$ , alors le  $RDP$  n'est pas simple.
- Un  $RDP$  *sans boucle* : est tel qu'il existe une transition  $T_j$  et une place  $P_i$  qui est à la fois place d'entrée et place de sortie de  $T_j$ , alors  $T_j$  a au moins une autre place d'entrée.

### 2.2.9 Domaines d'application des réseaux de Petri

Les *RDP* sont un outil assez général pour modéliser des phénomènes très variés. Il permet notamment [57], [39] :

- La modélisation et la conception des systèmes informatiques ;
- L'analyse des systèmes discrets et des interfaces homme-machine ;
- La gestion des ateliers de fabrication ;
- La conception des systèmes temps réel ;
- La modélisation des protocoles de communication ;
- L'analyse de données ;
- La programmation concurrente ;
- La gestion de la synchronisation ;
- La modélisation et la simulation des chaînes de production (de fabrication) ;
- La modélisation des machines à états finis et le phénomène de concurrence avec priorité ;
- ...etc.

En fait, ce modèle est adapté à tout type de système dans lequel circule des objets et des informations.

## 2.3 Les réseaux de Petri à arcs inhibiteurs

Dans certaines applications, le modèle des *RDP* tel qu'il est défini pourrait être limité et même incapable de spécifier et de modéliser certaines contraintes. Ainsi, plusieurs extensions de différents types ont été proposées pour augmenter la puissance d'expression du formalisme et permettre d'aborder des applications plus complexes. Une extension intéressante est celle des *RDP avec arc inhibiteurs*. Ce modèle permet d'interdire le franchissement d'une transition si le marquage d'une place est supérieur à une valeur. D'autre part, les matrices d'incidence sont complétées par *une matrice d'inhibition* qui impose que le marquage d'une place soit strictement inférieur à une valeur donnée.

### 2.3.1 Définition [46]

Un *réseau de Petri à arcs inhibiteurs* représente une extension des *RDP* qui permet de réaliser explicitement le test à zéro par exemple. C'est-à-dire, qu'une condition de franchissement sera exprimée cette fois-ci par l'absence de jetons dans une place en entrée d'un arc inhibiteur.

Un *RDP* à arcs inhibiteurs est un doublet  $R_z = \langle R, Inh \rangle$  tel que :

- $R$  est un *RDP*.
- $Inh : P \times T \rightarrow (\mathbb{IN} \setminus \{0\})$  est la fonction d'inhibition,  $Inh(p, t)$  représente alors le poids de l'arc inhibiteur.

Graphiquement, un arc inhibiteur est un arc dans lequel l'extrémité incidence aux transitions est représentée par un petit cercle au lieu d'une flèche.

**Exemple :** voici un exemple d'arc inhibiteur.

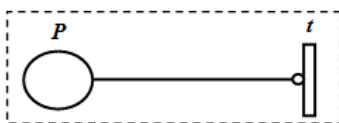


FIGURE 2.4 – Exemple d'un arc inhibiteur.

### 2.3.2 Règle de franchissement [48], [49]

Soit  $M$  un marquage d'un réseau de Petri à arcs inhibiteurs et  $t$  une transition :

- $t$  est franchissable à partir de  $M$  si seulement si :

$$\forall p \in P, M(p) \geq \text{Pré}(p, t) \text{ et } M(p) < \text{Inh}(p, t).$$

- Ce franchissement à partir de  $M$  conduit à un nouveau marquage  $M'$  défini comme suit :

$$\forall p \in P, M'(p) = M(p) - \text{Pré}(p, t) + \text{Post}(p, t).$$

## 2.4 Les atouts et les limitations des réseaux de Petri

### 2.4.1 Les atouts des réseaux de Petri [57]

- Ils permettent de décrire de manière précise, simple et efficace, mais non formelle la structure des systèmes parallèles ;
- Ils offrent un support graphique de conception simple, flexible et puissant en même temps, pour analyser et vérifier les propriétés du système ;
- Ils permettent de décrire un système étape par étape, en décomposant en éléments plus simples les éléments constitutifs initiaux du système ;
- Ils permettent de décrire à l'aide d'un même support de base, à la fois la structure et la dynamique d'un système ;
- Ils permettent de passer d'une description graphique d'un système à une description formelle permettant l'analyse mathématique du système (cohérence).
- Etant non lié à un langage particulier de réalisation, ils assurent l'indépendance de la modélisation et de sa représentation vis-à-vis des implémentations.

### 2.4.2 Limitations et insuffisances des réseaux de Petri

- La taille des modèles rend leur étude impossible : le problème se pose si l'on veut tester la possibilité d'atteindre un état, il n'est pas rare en effet que le nombre d'états d'un système soit de plusieurs centaines de milliers ;
- En pratique et dans les systèmes conformes à la réalité, la vérification des propriétés qualitatives seulement n'est pas suffisante pour s'assurer du bon fonctionnement d'un système, aussi aucune considération temporelle n'est prise en compte lors de la modélisation d'un système.

C'est pourquoi, on doit pouvoir évaluer les paramètres quantitatifs d'un système modélisé (temps moyen d'exécution d'une tâche, le taux de perte de messages, le nombre moyen de messages, etc.). Comme, la prise en compte de ces paramètres se révèle très importante, le recourt à d'autres modèles formels et d'autres extensions des RDP, prenant en compte l'approche temporelle tels que *les réseaux de Petri stochastiques* sont tout à fait nécessaires. L'avantage de ces modèles est qu'ils possèdent des techniques d'analyse exactes ou approchées permettant une analyse quantitative des systèmes et permettent aussi de modéliser les durées d'exécution des tâches du système, et ce en plus de l'analyse qualitative.

Nous nous intéressons dans ce travail, à un modèle particulier des réseaux de Petri, dit : *les réseaux de Petri stochastiques généralisés (RDPSG)*. Pour cela, nous présentons dans la section suivante, les points clés des processus stochastiques et plus précisément des chaînes de Markov, qui sont la base de l'analyse de ces réseaux servant de point de départ pour l'analyse des *RDPSG*.

## 2.5 Les Chaînes de Markov

Les processus stochastiques sont des modèles mathématiques utiles pour la description des systèmes comportant des phénomènes de nature probabiliste en fonction d'un paramètre qui est généralement le temps [50].

Dans cette section, nous présentons une classe particulière de processus stochastiques dits : *les processus markoviens*. La caractérisation fondamentale de ces derniers, appelés aussi les processus *sans mémoire*, est que tout l'histoire du processus est résumé par l'état courant. La connaissance de cet état suffit à prédire l'évolution future du système. Dans notre travail, on s'intéressera particulièrement aux processus markoviens à espace d'états dénombrable, appelés : *chaîne de Markov*.

### 2.5.1 Variable aléatoire [50]

Soit  $\Omega$  un ensemble d'évènements élémentaire issu d'une expérience aléatoire. On appelle variable aléatoire une application  $X$  réelle définie sur un espace de probabilité. L'ensemble des valeurs possibles de la fonction constitue l'espace d'états  $E$  de la variable aléatoire.

$$\begin{aligned} X : \Omega &\longrightarrow E \\ \omega &\longrightarrow X(\omega), \omega \text{ étant un évènement de } \Omega. \end{aligned}$$

On distingue deux types de variables aléatoires : *variables aléatoires discrètes et continues*.

- $X$  est dite variable aléatoire *discrète* lorsque  $E \subseteq \mathbb{Z}$ , dans ce cas  $E$  est dénombrable.
  - $X$  est dite variable aléatoire *continue* lorsque  $E \subseteq \mathbb{R}$ , dans ce cas  $E$  n'est pas dénombrable.
- Exemple : *la loi exponentielle*.

**Remarque :** Dans le cas où  $E \subseteq \mathbb{N}$  ( $\mathbb{R}^+$  resp.), on dit que  $X$  est une variable aléatoire *discrète* (*continue resp.*) à valeurs positives.

### 2.5.2 Loi exponentielle [58]

La loi exponentielle de paramètre  $\lambda$ , est une variable aléatoire à temps continu  $T$  à valeurs positives définie par sa densité de probabilité :

$$f_t = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & \text{si } t \geq 0, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

### 2.5.3 Loi de Poisson [58]

La loi de Poisson de paramètre  $\lambda \geq 0$ , est une variable aléatoire discrète  $X$  à valeurs positives définie par ses probabilités d'état :

$$P[X = n] = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda}$$

**Remarque**

- La moyenne d'une loi de Poisson de paramètre  $\lambda$  est :  $E[X] = \lambda$ .
- La moyenne d'une loi exponentielle de paramètre  $\lambda$  est :  $E[T] = \frac{1}{\lambda}$ .

### 2.5.3.1 Processus stochastiques

Les processus stochastiques servent à rendre compte des phénomènes dépendant à la fois du temps et du hasard.

### 2.5.4 Définition [58]

Un processus stochastique  $\{X(t), t \in T\}$  est une famille de variables aléatoires définie sur le même espace de probabilité, prenant des valeurs dans l'espace d'états  $E$  et indexé par le paramètre  $t \in T$ , où  $T$  est l'ensemble des temps. En d'autres termes, un processus stochastique représente une évolution dans le temps d'une variable aléatoire.  $T$  et  $E$  peuvent être discrets ou continus.

#### 2.5.4.1 Processus Markovien [59]

Un processus markovien est un processus stochastique qui satisfait la propriété de Markov (perte de mémoire) définie comme suit :

$$P[X(t) \leq x \mid X(t_n) = x_n, \dots, X(t_0) = x_0] = P[X(t) \leq x \mid X(t_n) = x_n] \text{ pour tout } t > t_n > t_{n-1} > \dots > t_0.$$

- Ce type de processus est dit *sans mémoire* (la propriété Markovienne), c'est-à-dire que l'état futur (à l'instant  $t$ ) ne dépend que de l'état courant (à l'instant  $t_n$ ) et pas de l'historique.
- Un cas particulier des processus markoviens est *le processus de Naissance et de mort* dans lequel, les seules transitions possibles, à partir d'un état  $x_n$ , sont vers les états voisins  $x_{n-1}$  et  $x_{n+1}$ .

### 2.5.5 Chaîne de Markov

Une chaîne de Markov (*CM*) est un processus markovien dont l'espace d'états est dénombrable. Si le temps est discret (*resp. continu*), la CM est dite à temps *discret (resp. continu)*.

#### 2.5.5.1 Chaîne de Markov à temps discret (CMTD) [58]

**A. Définition :** un processus stochastique à espace d'état et de temps discrets,  $\{X_n, n > 0\}$  est une chaîne de Markov à temps discret (CMTD) si et seulement si :

$$P[X_n = j \mid X_{n-1} = i_{n-1}, X_{n-2} = i_{n-2}, \dots, X_0 = i_0] = P[X_n = j \mid X_{n-1} = i_{n-1}].$$

- Une *CMTD* est caractérisée par des intervalles de temps constants de valeur égale à 1, entre les instants  $t_n$ .
- Dans une *CMTD*, le comportement futur ne dépend que de l'état actuel.
- $P_{ij}(n)$  est appelé *probabilité de transition* de l'état  $i$  à l'état  $j$  à l'instant  $n$ , en une seule étape.

#### B. Représentation d'une CMTD

**a. Diagramme de transition d'états :** Il est commode d'utiliser une représentation graphique d'une *CMTD* sous forme d'un graphe orienté, dans lequel on associe à chaque état de la chaîne un nœud et à chaque transition possible entre deux états, un arc orienté pondéré par la probabilité de transition.

**b. Matrice de transition :** La matrice de transition  $P = [p_{ij}]$  d'une *CMTD*, est une matrice carré d'ordre  $n$  correspondant à la cardinalité de l'espace d'état  $E$ , et dont les éléments correspondent aux probabilités de transition entre états. Les matrices de transitions sont appelées matrices stochastiques, et ils satisfont les deux conditions suivants :

- $0 \leq p_{ij} \leq 1; \forall i, j.$
- $\sum_j p_{i,j} = 1; \forall i.$

### 2.5.5.2 Chaîne de Markov à temps continu (CMTC)

**A. Définition :** une chaîne de Markov à temps continu est un processus stochastique  $\{X(t)\}_{t \geq 0}$  à espace d'état discret (dénombrable finie ou infinie) et à temps continu si seulement si [58], [59] :

$$P[X(t_n) = i_n \mid X(t_{n-1}) = i_{n-1}, X(t_{n-2}) = i_{n-2}, \dots, X(t_0) = i_0] = P[X(t_n) = i_n \mid X(t_{n-1}) = i_{n-1}], \forall n \text{ et } \forall t_0 < t_1 < \dots < t_n.$$

En d'autre termes, la probabilité pour que la chaîne soit dans un certain état à l'instant  $t_n$  ne dépend donc que de l'état du processus à l'instant  $t_{n-1}$  et pas des états dans lesquels il se trouvait aux instants ultérieurs  $(t_0, \dots, t_{n-2})$ .

Une *CMTC* est caractérisée par :

- Le temps passé dans tout état  $i$  de la chaîne est une variable aléatoire distribuée selon la loi exponentielle de taux  $\mu_i$  ;
- Les transitions d'un état  $i$  vers les autres états probabilistes, sont décrites par des taux de transitions distribués selon une loi exponentielle de taux  $\mu_{ij} = \mu_i p_{ij}$ , tel que :  $p_{ij}$  est la probabilité de se rendre dans l'état  $j$  en quittant l'état  $i$  et  $\mu_i$  est le temps passé dans l'état  $i$ .

**Note :** Le processus *semi-markovien* est considéré comme une extension des *CMTC*, dont les temps de séjour dans les états ont une distribution quelconque [46].

### B. Représentation d'une CMTC

Une chaîne de Markov à temps continu peut être décrite par :

**a. Diagramme de transition :** Un diagramme de transition est un graphe orienté libellé dont les sommets correspondent aux états de la chaîne de Markov et les arcs sont étiquetés par les taux de la distribution exponentielle associés aux transitions d'un état à un autre.

**b. Matrice des taux de transition (matrice génératrice) :** la matrice génératrice  $Q$  (ou générateur infinitésimal) est une matrice carrée d'ordre égal au nombre d'états de la chaîne de Markov. Ses éléments désignent les taux de transitions entre les états et ils sont calculés comme suit :

$$P[i, j] = \begin{cases} \lambda_{ij}, & i \neq j, \\ - \sum_{\substack{K=1 \\ k \neq i}}^n P[i, k], & i = j \end{cases}$$

Où :

- $n$  correspond au nombre d'états de la chaîne de Markov.
- $\lambda_{ij}$  désigne le taux de la distribution associée à la transition de l'état  $i$  vers l'état  $j$ . S'il n'y a pas de transition, l'élément correspondant est nul.

Il existe un lien très fort entre les *CMTC* et les *CMTD* et ce lien peut être formalisé par la définition de la *CMTD* incluse dans la *CMTC*.

**C. Chaîne de Markov incluse :** La *CMTD incluse* (*CMTDI*) dans la *CMTC* de générateur infinitésimal  $Q$ , dont les termes  $q_{ij}$  ( $i \neq j$ ) sont donnés par  $\mu_{ij} = \mu_i \cdot p_{ij}$ , est une chaîne de Markov à temps discret dont la matrice de transition a pour élément les  $p_{ij}$ .

Ainsi, la *CMTC* est caractérisée par des taux de transition entre états, les probabilités de transition de la chaîne incluse sont données par : 
$$p_{ij} = \frac{\mu_{ij}}{\mu_i} = \frac{\mu_{ij}}{\sum_{k \neq i} \mu_{ik}}$$
.

En plus, la nature de tout  $i$  dans une *CMTC* est la même que celle du même état dans la *CMTD incluse*.

### 2.5.6 Les propriétés des chaînes de Markov [60], [61], [62], [116]

**a. Homogénéité :** Une chaîne de Markov est *homogène* si la probabilité  $P_{ij} = \text{Prob} \{X_n = j \mid X_{n-1} = i\}$  ne dépend pas de  $n$ . On note :  $P_{ij} = \text{Prob} \{X_n = j \mid X_{n-1} = i\} = \text{Prob} \{X_1 = j \mid X_0 = i\}, \forall n \in \mathbb{N}$ .

**b. Irréductibilité :** Une chaîne de Markov est *irréductible*, si de tout état  $i$  de la chaîne, on peut atteindre tout état  $j$  (en un nombre fini d'étapes) :  $\forall i, j \in E, \exists m \geq 1$  tel que  $p_{ij}^{(m)} \neq 0$ , Où  $p_{ij}^{(m)}$  désigne la probabilité de transition de l'état  $i$  à l'état  $j$  en  $m$  étapes :  $p_{ij}^{(m)} = P[X_{m+n} = j \mid X_n = i], \forall n \in \mathbb{N}$ . En termes de théorie de graphe, le diagramme des transitions doit être fortement connexe.

**c. Récurrence :** Un état est dit *récurent* si la probabilité de repasser par cet état (probabilité de retour  $F_{ii} = 1$ ) est égale à 1 (un événement certain), sinon il est dit *non récurrent ou transitoire* ( $F_{ii} < 1$ ).

Un état  $i$  est *récurent non nul (positif)* si le temps passé pour retourner à cet état est fini ( $\mu_i < \infty$ ), et il est dit *récurent nul* si le temps moyen passé pour retourner à cet état est infini ( $\mu_i = \infty$ ).

**d. Périodicité :** La périodicité d'un état  $j$  est :  $D(j) = \text{PGCD} \{k \geq 1 / P_{jj}^{(k)} > 0\}$ . C'est le plus grand diviseur commun des longueurs des circuits allant de  $j$  à  $j$ .

La période d'une *CMTC* est égale au *PGCD* de la période de chacun des ces états. Elle est égale au *PGCD* de la longueur de tous les circuits du graphe.

Une chaîne de Markov est dite *périodique* si sa période est supérieure à 1 (est *apériodique* si sa période est égale à 1).

#### e. Théorème de solidarité

Les états d'une chaîne de Markov irréductible sont de même nature :

- Si l'un des états au moins est récurrent, alors tous les états sont récurrents.
- Si l'un des états est récurrent nul, alors ils sont tous récurrents nuls.
- Si l'un des états est récurrent positif, alors ils sont tous récurrents positifs.
- Si l'un des états est périodique, alors ils sont tous périodiques de même période.

**f. Ergodicité**

- Un état est *ergodique* s'il est *apériodique* et *récurrent positif* (*non nul*).
- Une chaîne de Markov est *ergodique* si tous ses états sont *ergodiques*.

**g. Stationnarité** : Un processus stochastique admet une distribution stationnaire sur ses états, s'il est *ergodique*. Ainsi, le système qu'il modélise se stabilise après l'écoulement d'un temps infini, et reste stable durant toutes les étapes suivantes du processus. Il y a alors possibilité de calculer différents paramètres de performances stationnaires.

**2.5.7 Analyse des chaînes de Markov [63], [116]**

La solution d'une chaîne de Markov à temps continu consiste à calculer le vecteur des probabilités  $\pi(t)$  avec  $\pi(t) = (\pi_1(t), \pi_2(t), \dots, \pi_n(t))$  et  $\pi_i(t) = Prob\{X(t) = i\}$ .

Si la chaîne de Markov est *ergodique*, elle admet une *distribution stationnaire*. Ainsi, le vecteur des probabilités stationnaires existe et est égal à  $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ , où  $\pi_i = \lim_{t \rightarrow \infty} Prob\{X(t) = i\}$ .

Ce vecteur peut être obtenu par la résolution du système d'équations linéaires suivant :

$$\begin{cases} \pi \cdot P = \pi \\ \sum_{i \in E} \pi_i = 1 \end{cases}$$

Où :  $E$  est l'espace d'états de la chaîne de Markov.

La résolution de ce système d'équations, nous donnera les probabilités stationnaires des différents états.

**2.5.8 Avantages des chaînes de Markov**

- Les chaînes de Markov fournissent des résultats exacts avec des méthodes simples.

**2.5.9 Inconvénients des chaînes de Markov**

- Nécessité de l'énumération de tous les états et la détermination de toutes les transition possibles entre chaque couple d'états.
- Risque d'erreur ou d'omission important.
- Taille de l'espace d'états, généralement trop important.

Pour cela, des modèles stochastiques plus abstraits ont été proposés. Dans ce qui suit nous présentons le modèle des *réseaux de Petri stochastiques*.

**2.6 Les réseaux de Petri stochastiques (RDPS)**

**2.6.1 Définition informelle [115]**

Un réseau de *Petri stochastique (RDPS)* [64],[41] est un réseau de Petri ordinaire dans lequel est associée à chaque transition une variable aléatoire modélisant le délai de franchissement de cette transition. Ce délai représente l'intervalle de temps qui doit s'écouler entre l'instant de

sensibilisation de cette transition et l'instant de son franchissement (la fin de la tâche associée). Ce dernier est distribué selon une loi exponentielle négative de taux  $\lambda$  (Classe des *RDPS Markoviens*). On étiquette les arcs par leur taux de franchissement, qui peuvent être constants ou dépendants de marquage de certaines places. Il est important de noter qu'une place peut être suivie de plusieurs transitions temporisées, et que le tir de ces transitions est basé sur le modèle compétitif.

Dans notre travail nous nous intéressons aux *RDPS markoviens*.

### 2.6.2 Définition formelle [65]

Un réseau de Petri stochastique est un couple  $S = (R, W)$  où :

- $R$  est le *RDP* marqué, ayant  $M_0$  comme marquage initial.
  - $W = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  est le vecteur des taux de franchissement associés aux transitions.
- Autrement dit,  $W = \{\lambda_i \in \mathbb{R}^+ / \lambda_i \text{ est le taux de franchissement associé à la transition } t_i\}$ .

**Remarque :** le taux de franchissement  $\lambda_i$  peut être dépendant du marquage. Par conséquent, une transition peut avoir un taux de franchissement qui diffère d'un marquage à un autre. Dans ce cas, on note  $\lambda_i(M_j)$ , le taux de franchissement associé à la transition  $t_i$  pour le marquage  $M_j$  [59].

### 2.6.3 Evolution des réseaux de Petri stochastiques [59]

L'évolution d'un *RDPS* est décrite par un ensemble de marquages obtenus à des instants de franchissement successifs.

- Lorsqu'un nouveau marquage est atteint, chaque transition  $t_i$  sensibilisée prend une instance de tir de délai aléatoire de la fonction de densité de probabilité associée. Le paramètre de cette fonction associé à la transition  $t_i$  est le taux de tir  $\lambda_i$ .
- Si le marquage sensibilise plusieurs transitions, la transition à tirer est déterminée par une des politiques de franchissements. La politique la plus appliquée dans la pratique est la politique de *course* (modèle *concurrentiel*). Cette politique choisit comme transition à tirer parmi les transitions franchissables, celle qui a le plus petit délai de franchissement. Il existe une autre politique de franchissement appelée politique de *pré-sélection*, où la transition tirée est choisie selon une autre variable aléatoire indépendamment du délai de franchissement.
- Le nouveau marquage généré est obtenu selon la règle de franchissement standard des *RDP* classiques.

**Remarque :** La probabilité que la transition sensibilisée  $t_k$  soit celle qui prend le délai de franchissement minimal est : 
$$P\{t_k\} = \frac{\lambda_k}{\sum \lambda_i}$$

Où : la somme est faite sur tous les indices des transitions sensibilisées.

#### 2.6.3.1 Le temps moyen de séjour dans un marquage [66]

Le temps moyen de séjour dans un marquage donné correspond à la durée de franchissement de la transition qui a provoqué le changement d'état. La valeur moyenne de ce temps de séjour est donnée par la formule suivante :

$$T_{ms} = \frac{\mu_{ij}}{\mu_i} = \frac{1}{\sum_{t_i \in E(M_i)} \lambda_i}.$$

$E(M_i)$  : est l'ensemble de toutes les transitions sensibilisées par le marquage  $M_i$ .

#### 2.6.4 Isomorphisme d'un RDPS avec une chaîne de Markov [61]

Deux modèles stochastiques *RDPS* et *CM* sont isomorphes si seulement si :

- Il existe une application entre les espaces des états des deux modèles ;
- Il existe une transition dans un modèle si et seulement s'il existe une transition dans l'autre ;
- La probabilité d'occurrence d'une transition pendant la même durée  $t$  dans un modèle est égale à la probabilité d'occurrence de la même transition pendant la même durée  $t$  dans l'autre modèle.

**Théorème 2.1.** *Un RDPS borné dont les ensembles de places et de transitions sont finis, est isomorphe à une chaîne de Markov à temps continu homogène de dimension 1 et à espace d'états fini [61].*

#### 2.6.5 Analyse des RDPS

Un des intérêts majeurs des *RDPS* est de pouvoir combiner l'analyse qualitative et l'analyse quantitative.

##### 2.6.5.1 Analyse qualitative

Pour la vérification des propriétés qualitatives, les méthodes d'analyse utilisées pour les *RDP* ordinaires peuvent être appliquées (vivacité, bornitude, etc.), du fait que le graphe des marquages accessibles d'un *RDPS* est identique à celui correspondant au *RDP* classique. La seule différence est que les arcs du graphe temporisé sont valués par les taux correspondants aux transitions.

##### 2.6.5.2 Analyse quantitative

Elle vise à calculer les paramètres quantitatifs de performance. Cette analyse est possible grâce à l'isomorphisme entre *RDPS* et les chaînes de Markov (*CM*). En effet, en utilisant la propriété d'ergodicité de la *CM déduite*, le régime stationnaire est atteint au bout d'un temps infini. Ainsi, on peut évaluer les performances du système modélisé.

**Théorème 2.2.** *Un RDPS borné est ergodique s'il admet l'état initial comme état d'accueil. Graphiquement, le graphe des marquages accessibles doit être fortement connexe [61].*

##### 2.6.5.3 Etapes de l'évaluation des performances quantitatives des RDPS

Les étapes de l'évaluation des performances d'un système sont :

- Modélisation du système à analyser ;
- Construction du graphe des marquages accessibles correspondant ;
- Vérification de l'ergodicité du modèle ;
- Construction de la matrice des taux de transition  $Q$  (*matrice génératrice*), qui est une matrice carrée dont l'ordre est égal au nombre de marquages dans le graphe d'accessibilité et les éléments désignent les taux de transition entre les marquages et ils sont définis comme suit :

Etant donnés deux marquages  $M_i$  et  $M_j$  ( $i \neq j$ ) avec une ou plusieurs transitions allant de  $i$  à  $j$ , nous avons :

$$Q[i,j] = \begin{cases} \lambda_{ij}, & \text{si } i \neq j, \\ -\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Q[i,k], & \text{sinon} \end{cases}$$

Où :

- $n$  correspond au nombre de marquages accessibles.
- $\lambda_{ij}$  désigne le taux de la distribution associée à la transition de l'état  $i$  à l'état  $j$ , les autres éléments de la matrice sont nuls.
- Calcul du vecteur des probabilités stationnaires  $\pi$ , en résolvant le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \Pi.Q = 0 \\ \sum_{i=1}^n \pi_i = 1 \end{cases}$$

Sachant que  $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_n)$ .

- Calcul des paramètres de performances.

Les *RDPS* permettent d'analyser quantitativement et qualitativement les systèmes informatiques, téléphoniques ou de production mais ne tiennent pas compte de certaines réalités de ces systèmes. Le problème principal des *RDPS* vient du fait que, les durées d'exécution de toutes les actions dans les systèmes modélisés, sont temporisées. En fait, il existe dans ces systèmes des transitions qui correspondent à des aspects purement logiques du comportement du système tel qu'aucune temporisation ne peut leur être associée, telles que les transitions modélisant des synchronisations pures ou les opérations d'allocation de ressources. Par ailleurs, dans le même modèle, on peut trouver des activités rapides et d'autres plus lentes, et la négligence de cet aspect peut donner un modèle qui est logiquement incorrect [67].

Pour résoudre ce problème, une nouvelle classe de *RDPS* est apparue dans [42] sous le nom de *réseaux de Petri stochastiques généralisés (RDPSG)* dans lesquels les actions logiques sont représentées par des transitions dont la durée de franchissement est nulle.

## 2.7 Les réseaux de Petri stochastiques généralisés (RDPSG)

### 2.7.1 Définition informelle [59]

On appelle un RDPSG, un RDPS contenant les deux types de transitions suivants :

- **Les transitions temporisées** : sont des transitions dont les délais de franchissement sont associés à des variables aléatoires déterminant la durée d'exécution des différentes activités. Quand ces délais de franchissement sont des variables aléatoires à distributions exponentielles négatives, on parle de *RDPSG markoviens*.
- **Les transitions immédiates (instantanées)** : se caractérisent par un délai de franchissement nul (taux de franchissement =  $\infty$ ), permettant ainsi de représenter les actions prioritaires qui ne consomment aucun temps, comme la synchronisation, les opérations logiques, les événements d'urgence ou les activités prioritaires. Il est à noter que ces tran-

sitions sont plus prioritaires que les transitions temporisées. De plus, plusieurs niveaux de priorités peuvent être définis entre les transitions immédiates en définissant un *poids* pour chaque transition [59].

Nous nous intéressons dans ce mémoire à la classe des *RDPSG markoviens*. Ainsi, dans ce qui suit, le mot *RDPSG* désignera implicitement un *RDPSG markovien*.

### 2.7.2 Définition formelle

Un *RDPSG* est un triplet  $\langle R_0, \pi, w \rangle$  où :

- $R_0$  est le *RDP* classique marqué (non temporisé sous-jacent).
- $\pi : T \rightarrow \mathbb{N}$ , est une fonction de *priorité* qui associe à chaque transition  $t$  de  $T$ , une valeur entière, appelée priorité de la transition  $t$ . Généralement, elle associe à chaque transition temporisée la valeur 0 et à chaque transition immédiate la valeur 1 (la valeur 1 est plus prioritaire que la valeur 0). Donnant ainsi plus de priorité aux transitions immédiates.
- $W : T \rightarrow \mathbb{R}^+$ , la fonction qui associe à chaque transition temporisée un *délai* de franchissement (taux de franchissement), et à chaque transition immédiate un *poids*. Les poids sont utilisés dans le calcul des probabilités de franchissement des transitions immédiates et pour la résolution des conflits entre plusieurs transitions immédiates sensibilisées en même temps.

Dans la représentation graphique des *RDPSG*, les transitions immédiates sont représentées par des *traits* et les transitions temporisées sont représentées par des *rectangles vides*.

### 2.7.3 Processus Stochastique associé à un RDPSG

A cause de la présence de transitions immédiates, l'ensemble des marquages accessibles d'un *RDPSG* contient deux types de marquages [68], [67] :

- **Les marquages tangibles** : ce sont des marquages qui sensibilisent uniquement les transitions temporisées (aucune transition immédiate n'est franchissable).
- **Les marquages évanescents** : ce sont des marquages dans lesquels il y a au moins une transition immédiate franchissable.

Les marquages tangibles représentent les états où le système modélisé passe un certain temps. Les marquages évanescents, cependant, modélisent les états dans lesquels le temps passé est nul. Le processus stochastique associé à un *RDPSG* est un *processus stochastique semi-markovien*, où la distribution de temps de séjour dans les marquages est une composition de distributions exponentielles négatives et distributions déterministes nulles.

Le *temps de séjour moyen* dans un marquage évanescent est nul, tandis que, le temps de séjour dans un marquage tangible  $M$  est une variable aléatoire correspondant au minimum des temps de franchissement des transitions sensibilisés par ce marquage, autrement dit, c'est une loi exponentielle avec un paramètre  $\lambda_M$ , qui est la somme de tous les taux de franchissement de ces transitions [68], [67] :

$$\lambda_M = \sum_{t_k \in S(M)} W(t_k)$$

Où :  $S(M)$  est l'ensemble des transitions franchissables à partir de  $M$ .

### 2.7.4 Les règles de franchissement dans les RDPSG

Tout comme un *RDP* ordinaire, l'évolution d'un *RDPSG* se fait par une suite successive de marquages. Ainsi, le franchissement des transitions dans un *RDPSG* dépend du type de marquage atteint  $M$ , que ce soit tangible ou évanescent. Soit  $S(M)$  l'ensemble de transitions sensibilisées de ce marquage :

- Si  $S(M)$  ne contient que des transitions tangibles, alors la règle de franchissement de transitions est identique au cas d'un *RDPS*, *i.e.* que toute transition sensibilisée peut être tirée et le tir d'une transition donnée dépend des taux de franchissement des transitions sensibilisées.
- Si  $S(M)$  comprend au moins une transition immédiate ( $M$  est évanescent), alors seules les transitions immédiates sont franchissables car elles sont plus prioritaires que les transitions temporisées, vu leur temps de franchissement nul. Laquelle des transitions immédiates sera tirée si on en a plusieurs ? Ce problème ne peut se poser qu'en cas de transitions en conflit effectif, les transitions concurrentes peuvent être simultanément tirées. Si  $S(M)$  contient plusieurs transitions en conflit, alors c'est celle qui a la plus grande priorité qui est franchi. Et si plusieurs transitions immédiates ont la même priorité alors celle qui a le poids le plus élevé est franchi.

Soit  $C(M) \subset S(M)$  l'ensemble des transitions immédiates en conflit entre elles, la probabilité qu'une transition  $t_j \in C(M)$  soit tirée est donnée par :

$$P[t_j | M] = \frac{w(t_j)}{\sum_{t_k \in C(M)} W(t_k)}.$$

Où :  $W$  est le poids de la transition  $t_i$ .

Formellement, une transition  $t$  est franchissable dans le marquage  $M$  si et seulement si :

- $\forall p \in P, M(p) \geq \text{Pré}(p, t)$  ;
- Et il n'existe pas de transition plus prioritaire que  $t$  qui soit franchissables :

$$\forall t' \in T \mid \pi(t') \geq \pi(t); \text{ on } \neg M(t').$$

- Le nouveau marquage  $M'$  résultant après le franchissement de la transition  $t$  (temporisée ou immédiate) à partir d'un marquage  $M$  est défini alors comme suit :

$$M' = M - \text{Pré}(\cdot, t) + \text{Post}(\cdot, t).$$

## 2.7.5 Analyse des performances d'un RDPSG [59], [50]

### 2.7.5.1 Analyse qualitative

Pour l'analyse des propriétés qualitatives telle que : la vivacité, la bornitude, les états d'accueil, etc, les méthodes d'analyse utilisées pour les *RDPS* peuvent être appliquées. Cependant, comme les transitions immédiates ont une priorité sur les transitions temporisées, nous traitons toutes les transitions comme des transitions simples sans temporisation mais avec une certaine priorité. En fait, la présence des priorités dans le modèle des *RDPSG* réduit le nombre de marquages accessibles par rapport au *RDPS*. Ainsi, l'espace d'états d'un *RDPSG* est isomorphe au graphe d'accessibilité du *RDP* non-temporisée avec priorité. D'autre part, l'ensemble d'accessibilité du *RDP* avec priorité est inclus dans l'ensemble d'accessibilité du *RDP* sans priorité.

### 2.7.5.2 Analyse quantitative

L'analyse quantitative consiste à calculer les probabilités stationnaires et les indices de performance. Elle est basée essentiellement sur les techniques d'analyse des chaînes de Markov grâce à l'isomorphisme entre *RDPSG* et *CM*. Néanmoins, ceci nécessite la vérification de certaines propriétés résumées dans la condition d'ergodicité du *RDPSG*. La priorité d'ergodicité garantit l'existence du régime stationnaire, et une fois l'ergodicité du modèle est prouvée, on procède au calcul des probabilités d'états stationnaires des marquages tangibles seulement, car la probabilité de s'y trouver dans les marquages évanescents est nulle. De plus, les marquages évanescents augmentent la taille de la matrice génératrice, ce qui rend le calcul de la solution plus coûteux en temps et en espace mémoire. Pour cela, la *CM* doit être réduite en éliminant les marquages évanescents avant la résolution. La chaîne obtenue est dite *chaîne de Markov réduite (CMR)*.

### 2.7.5.3 Évaluation des indices de performance d'un RDPSG [69]

Pour évaluer les performances d'un *RDPSG*, on suit les étapes suivantes :

1. Construire le *GMA* (graphe des marquages accessibles) comme pour les *RDP* ordinaires.
2. Etiqueter ce graphe par des taux de franchissements exponentiels lorsqu'il s'agit des transitions temporisées, et par des taux infinis pour des transitions immédiates.
3. Fusionner les marquages tangibles avec les marquages évanescents qui les succèdent. On obtient ainsi un nouveau graphe dit *réduit*, qui reste *isomorphe à une chaîne de Markov à temps continu (la chaîne de Markov réduite)*. Cette fusion n'influe pas sur le comportement dynamique du système, car le processus passe un temps nul dans le marquage évanescents [42].
4. A partir de ce graphe réduit, on construit la matrice des taux de transitions entre états. Cette matrice est utilisée pour calculer les probabilités stationnaires. Celles-ci, à leur tour, nous permettent de déduire les indices de performances désirés.

#### Remarque

Le graphe réduit (sans marquages évanescents) ne permet pas d'évaluer le système qualitativement car il est différent du *GMA*, et ce graphe ne sont pas identiques, et ce à cause de l'introduction de la priorité.

Nous présentons maintenant les formules de calcul des principaux paramètres quantitatifs à l'état stationnaire.

### 2.7.5.4 Calcul des indices de performances à l'état stationnaire

- **Fréquence moyenne de franchissement d'une transition** : On appelle fréquence moyenne (ou encore débit moyen) de franchissement d'une transition  $t_i$ , le nombre moyen de tirs de  $t_i$  en une unité de temps. Elle est calculée par :

$$F^*(t_i) = \sum_{M_j \in E(t_i)} \lambda_i(M_j) \cdot \pi_j$$

Où :

$E(t_i)$  : est l'ensemble des marquages où la transition  $t_i$  est franchissable.

$\lambda_i(M_j)$  : est le taux de franchissement de  $t_i$  en  $M_j$ .

- **Nombre moyen de marques dans une place** : Le nombre moyen de marques dans une place  $p_i$  est calculé à partir des probabilités stationnaires, en appliquant la formule :

$$M^*(p_i) = \sum_{j:M_j \in A}^n M_j(p_i) \cdot \pi_j$$

Où :  $M_j(p_i)$  est le nombre de jetons dans la place  $p_i$  pour le marquage  $M_j$  et  $A$  est l'ensemble des marquages accessibles.

- **Le temps moyen de séjour d'une marque dans un sous-réseau** : Le délai moyen qu'un jeton passe dans une partie  $S$  (dite sous-réseau) d'un *RDPSG* à l'état stationnaire, peut être calculé comme suit :

$$E[T] = \frac{E[N]}{E[\gamma]}$$

Où :

- $E[T]$  est le délai moyen.
- $E[N]$  est le nombre moyen de jetons dans le sous-réseau  $S$ .
- $E[\gamma]$  est le taux d'arrivée effectif des jetons dans  $S$ .
- **La probabilité d'un événement** : La probabilité d'un événement particulier  $E$  peut être calculée en sommant les probabilités de tous les marquages dans lesquels la condition correspondante à la définition de l'événement est vérifiée. Ainsi, cette probabilité est calculée comme suit :

$$P\{E\} = \sum_{m_i \in X} \pi_i.$$

Où :

$X = \{m_i \in A(R, M_0); \gamma(m_i) = true\}$  est l'ensemble des marquages accessibles où la condition  $E$  est vérifiée.

## 2.8 Conclusion

Ce chapitre présente une synthèse sur les réseaux de Petri. Réputés très puissants dans les laboratoires de recherche ainsi que dans le monde industriel, les réseaux de Petri sont un outil de modélisation graphique et mathématique, utilisé dans la description et l'étude des systèmes caractérisés par être concurrents, parallèles, asynchrones, non-déterministes, et / ou stochastiques.

Les *RDP* stochastiques généralisés (*RDPSG*), sont une extension des *RDP* classiques qui associent des transitions temporisées et des transitions immédiates dans un même modèle. Leur principal avantage réside dans la possibilité et la facilité de représentation des opérations dont l'exécution nécessite un certain temps tel que le service d'une requête de client, aussi bien que les événements instantanés comme les opérations logiques, la synchronisation et la concurrence. Un autre avantage de la modélisation par *RDPSG* est qu'ils permettent de calculer les paramètres quantitatifs exactes du système modélisé.

Vu ces avantages, nous proposons dans ce qui suit la modélisation et l'analyse des stratégies de contrôle d'admission des appels dans les réseaux mobiles cellulaires avec appels répétés et politique de favoritisation des appels de handovers à l'aide du formalisme des *RDPSG*.

## CHAPITRE 3

# STRATÉGIES DE CONTRÔLE D'ADMISSION DES APPELS DANS LES RÉSEAUX MOBILES CELLULAIRES.

### 3.1 Introduction

Dans les réseaux mobiles cellulaires, en particulier lorsque les petites cellules sont utilisées (*Small Cells*), la procédure de handover est très fréquente et a un impact significatif sur les performances du réseau. En effet, la terminaison forcée de l'appel est un phénomène très gênant pour l'abonné. D'où, utiliser des mécanismes permettant de réduire la probabilité de coupure de la communication devient primordiale. Ainsi, l'accès au réseau est accordé ou refusé aux abonnés suivant une stratégie de contrôle d'admission utilisée sur la base des critères prédéfinis, en tenant compte des conditions de la charge du réseau.

Les stratégies de contrôle d'admission dans les réseaux mobiles cellulaires ont attiré beaucoup d'attention au cours des deux dernières décennies, vue la popularité sans cesse croissante des communications cellulaires et le rôle central que le contrôle d'admission joue dans l'amélioration de la qualité de service (*QoS*). De nombreuses politiques de contrôle d'admission sont proposées dans la littérature, elles permettent de favoriser les appels de handovers par rapport aux nouveaux appels [70].

Dans ce chapitre, nous présentons dans une première partie, les différentes stratégies de contrôle d'admission des appels dans les réseaux mobiles cellulaires. Après dans une seconde partie, nous proposons une classification pour ces stratégies, ainsi, qu'un aperçu bibliographique des différents travaux réalisés dans ce domaine. Et nous terminons le chapitre par une conclusion.

### 3.2 Contrôle d'admission des appels (CAC : Call Admission Control)

Le contrôle d'admission des appels (*CAC : Call Admission Control*) est une technique qui vise à assurer la meilleure *QoS* dans un réseau, en limitant l'accès à ses ressources. Les performances d'un réseau se détériorent rapidement si les demandes acceptées dépassent sa capacité. Pour éviter ce problème, le *CAC* assure qu'un nouvel appel admis ne provoque pas une dégradation de la *QoS*. En d'autres termes, chaque nouvel appel susceptible de recevoir un service est soumis à un contrôle d'admission qui décide si celui-ci est accepté ou rejeté. Ce mécanisme

de *CAC* est placé à l'entrée du réseau : il consiste à n'accepter de nouvelles demandes d'appels que si les ressources sont disponibles pour répondre aux exigences de la nouvelle demande d'appel, sans violer la *QoS* des appels déjà acceptés. Le problème de contrôle d'admission dans les réseaux mobiles cellulaires est de plus en plus compliqué en raison de leurs caractéristiques uniques, telles que les interférences des accès multiples aux canaux, l'affaiblissement du canal, les exigences de handover, la bande passante limitée, la favorisation et la hiérarchisation des services, sans oublier les contraintes liées à la mobilité des abonnés et la diversité des services (voix, donnée, vidéo). L'objectif du *CAC* est de garantir aux appels admis dans une cellule une faible probabilité de coupure et de bloquer les appels dont les ressources demandées ne sont pas disponibles [70], [36].

Vue que la coupure d'un appel en cours est plus gênante pour les abonnés que le blocage d'un nouvel appel, les appels de handovers ont typiquement une priorité plus élevée que les nouveaux appels concernant l'accès à l'ensemble des ressources radios. Ce traitement préférentiel donne de bonnes performances, mais, en contrepartie, le trafic écoulé est généralement réduit et la probabilité de blocage des nouveaux appels est augmentée, ce qui dégrade l'utilisation de la bande passante. Dans le *CAC*, la probabilité de blocage d'un nouvel appel et celle de coupure d'un appel de handover sont considérées comme des paramètres judicieux de la *QoS*. Par conséquent, un bon modèle de *CAC* doit équilibrer ces deux mesures afin de garantir la meilleur *QoS*, et garantir ainsi l'exploitation la plus efficace possible des rares ressources du réseau [70], [36].

Les stratégies de *CAC* peuvent être classées en fonction du nombre de classes de services en deux groupes [36] :

1. **Stratégies de *CAC* à classe de service unique** : étaient dominantes en première et deuxième génération (2G) des réseaux mobiles cellulaires, lorsque le service de la voix était le principal (et parfois le seul) service offert.
2. **Stratégies de *CAC* à classes de services multiples** : devenues plus pertinentes avec la montée croissante de l'intérêt des données et des services multimédias, en particulier dans la deuxième génération améliorée (2.5G) et la troisième génération et au-delà (3G/4G).

La section suivante présente brièvement les différentes stratégies de *CAC* pour la favorisation (priorisation) des appels de handovers.

### 3.3 Stratégies de favorisation des appels de handovers

Les stratégies de favorisation des appels de handovers peuvent être classées en trois grandes catégories [71], [72] :

1. La stratégie de la réservation des canaux de garde ***GCS*** (*Guard Channel Scheme*).
2. La stratégie de la mise en file d'attente des appels de handovers ***QPS*** (*Queuing Priority Scheme*).
3. La stratégie de Sub-rating ***SRS*** (*Sub-Rating Scheme*).

Ces stratégies de priorité permettent d'améliorer les performances du réseau mobile cellulaire, contrairement aux schémas standards connus sous le nom de "*Non-Prioritized Scheme*" ou ***NPS***. Avec ***NPS***, les appels de handovers sont traités de la même manière que les nouveaux appels et ils sont bloqués si aucun canal libre ni disponible. Résultat, la probabilité de blocage des appels

de handovers est égale à celle de blocage des nouveaux appels, ce qui n'arrange pas souvent les abonnés.

### 3.3.1 Stratégie de la réservation des canaux de garde (GCS)

Introduite dans les années 80 [73], la stratégie **GCS** est une méthode simple qui consiste à réserver un nombre *fixe* ou *dynamique* de canaux parmi la totalité des canaux disponibles dans chaque cellule exclusivement pour les appels de handovers. Ainsi, les canaux disponibles dans chaque cellule sont divisés en deux ensembles. Le premier ensemble de canaux (dits *partagés* ou *ordinaires*) est utilisé aussi bien par les nouveaux appels que par les appels de handovers. Le second ensemble de canaux est dédié aux appels de handovers. Ces canaux réservés sont appelés *canaux de garde* ou *canaux gardiens* (*Guard Channel*). Dans **GCS**, la priorité la plus élevée est attribuée aux appels de handovers par rapport aux nouveaux appels. Par exemple,  $g$  canaux sont réservés aux appels de handovers sur un total de  $N$  canaux disponibles dans une cellule. Les nouveaux appels et les appels de handovers partagent ensemble les autres canaux restants  $n=N-g$ , voir la figure 3.1. Si le nombre de canaux disponibles dans la cellule est inférieur ou égal à  $g$ , toutes les arrivées des nouveaux appels sont rejetées ou bloquées, parce que les canaux libres restants sont réservés pour les appels de handovers. Un appel de handover est bloqué si aucun canal ni disponible dans toute la cellule.

L'organigramme de **GCS** est présenté dans la figure 3.2 [72], [74].

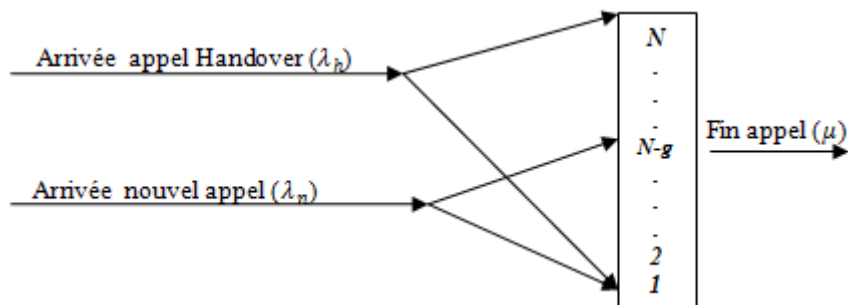


FIGURE 3.1 – Modèle de système avec priorité des appels de handovers et canaux gardiens.

Il existe quatre types différents de la stratégie **GCS** [75] :

1. **Le modèle de priorité de coupure (*Cutoff priority scheme*)** : ce modèle réserve une partie parmi le nombre total de canaux pour les appels de handovers. Une fois un canal est libéré, il va rejoindre l'ensemble des canaux partagés.
2. **Le modèle fractionnel de canaux de garde (*Fractional guard channel scheme*)** : un nouvel appel est admis dans la cellule avec une certaine probabilité en fonction du nombre de canaux actuellement occupés dans la cellule. Cette probabilité dénote la probabilité d'acceptation d'un nouvel appel. Un appel de handover est admis avec une probabilité égale à 1. Cette politique offre plus de flexibilité que la politique **GCS** classique et garantit que la probabilité de coupure de la communication ne dépasse pas un seuil prédéfini, en même temps permet de minimiser la probabilité de blocage des nouveaux appels.

L'algorithme de fonctionnement correspondant :

**Algorithm 1:** L'algorithme de fonctionnement.

```

/* random(0,1) : retourne un nombre aléatoire généré uniformément dans l'intervalle [0,1]
*/
if new call then
    if (random(0,1) ≤ β (nombre de canaux occupés)) then
        | admit call;
    else
        | reject call;
    end
end
if handover call then
    if (numberOfOccupiedChannels < C) then
        | admit call;
    else
        | reject call;
    end
end
end

```

3. **Le modèle de délimitation (bondissement) de nouvel appel (*New Call Bounding Scheme*)** : dans ce modèle, le nombre de nouveaux appels admis dans une cellule est limité à un certain nombre inférieur au nombre total des canaux disponibles.
4. **Le modèle basé sur la division rigide (*the Rigid Division-based Scheme*)** : ce modèle divise tous les canaux disponibles dans une cellule en deux groupes : l'un pour des usages communs (nouveaux et handovers) et l'autre réservé uniquement pour les appels de handovers. Il représente le modèle de canaux gardiens classique.

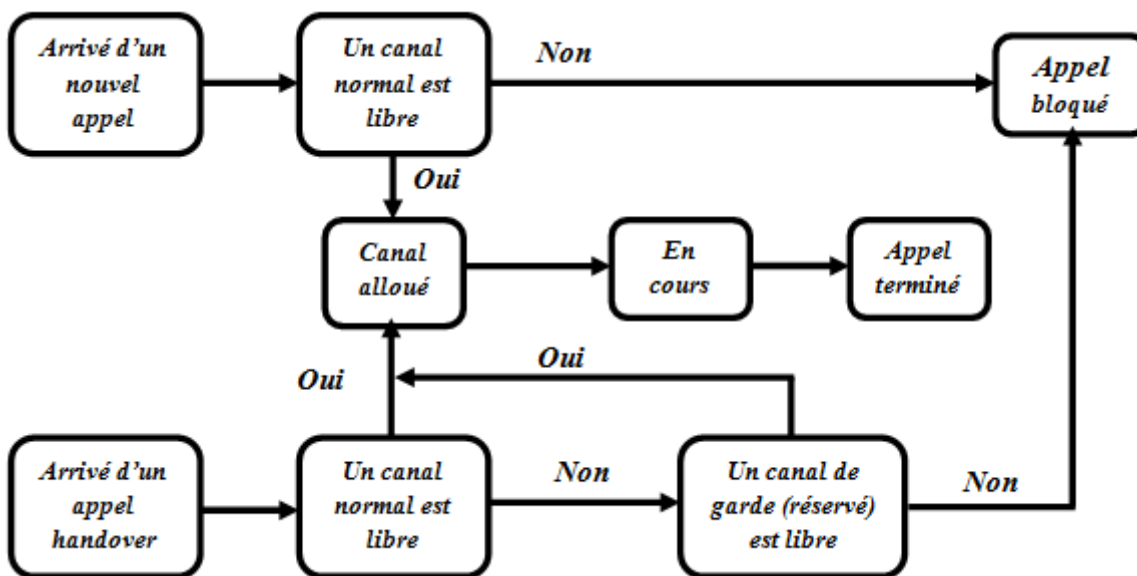


FIGURE 3.2 – Organigramme de la stratégie de canaux de garde (GCS) [74].

✓ *Fedyanin* et *Sarkar* dans [76], ont proposé un algorithme itératif pour l'étude des performances des réseaux mobiles cellulaires basé sur ce modèle.

### 3.3.2 Stratégie de la mise en file d'attente des appels de handovers (QPS)

La technique de la mise en file d'attente des appels de handovers avec ou sans réservation de canaux de garde est une stratégie qui permet de réduire la probabilité de terminaison forcée des appels de handovers. Un tel mécanisme est possible grâce au recouvrement des cellules qui permet d'avoir des zones (appelées *zones de handovers*) dans lesquelles les mobiles peuvent physiquement communiquer avec deux stations de base *SB* en même temps (voir la figure 3.3) et l'existence d'un intervalle de dégradation pendant lequel la SM (station mobile) traverse la région de handover. Durant cet intervalle de dégradation, la qualité de la communication se dégrade avec le déplacement du mobile. La SM génère une requête de handover et continue à être servie par la SB servante. La puissance du signal, dans cet intervalle, est entre le seuil d'initialisation de handover et le seuil de réception de la SB.

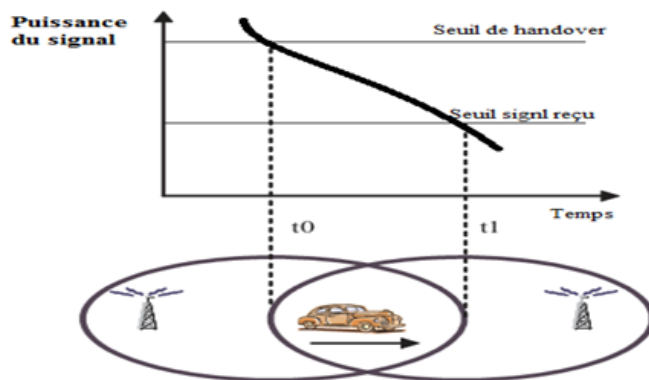


FIGURE 3.3 – Zone de handover.

Dans cette technique, une arrivée d'un appel de handover qui ne trouve aucun canal libre est insérée dans une file d'attente jusqu'à ce que les ressources suffisantes soient disponibles dans la SB cible, voir la figure 3.4. Dans ce cas, aucun nouvel appel ne peut être accepté. Dans le cas où un canal dans la cellule adjacente devient disponible avant l'expiration de l'intervalle de dégradation, le handover peut avoir lieu avec succès (voir la figure 3.5). Si la SM traverse la région de handover et ne trouve pas un canal disponible, l'appel en cours est forcé à se terminer. Une arrivée d'un nouvel appel est bloquée s'il ne trouve aucun canal libre dans le cadre de la technique *QPS* sans réservation de canaux de garde ou s'il trouve tous les canaux partagés occupés dans le cadre de la technique *QPS* avec réservation de canaux de garde (*QPS + GCS*). La durée du séjour d'une SM dans la zone de handover dépend des paramètres du système tel que la vitesse du mobile, la direction du mouvement, et la taille de la cellule [71], [30].

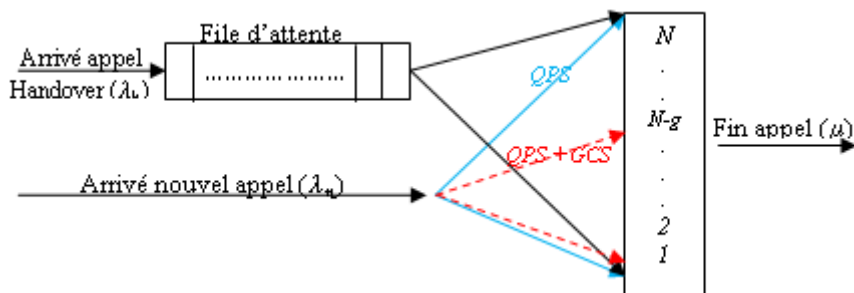


FIGURE 3.4 – Modèle avec priorité et mise en file d'attente des appels de handovers.

Dans la file d'attente allouée aux appels de handovers, les requêtes de handovers peuvent être servies selon la discipline *FIFO* (*First-In-First-Out*) où la requête de handover servie est la

première qui arrive à la file ou d'autres disciplines comme par exemple la discipline *Measurement-Based Priority Scheme (MBPS)*, où les requêtes de handovers sont servies suivant une discipline dynamique non préemptive en se basant sur la qualité de la liaison. L'objectif de cette discipline est de servir en premier lieu les appels ayant une qualité de liaison dégradée [72].

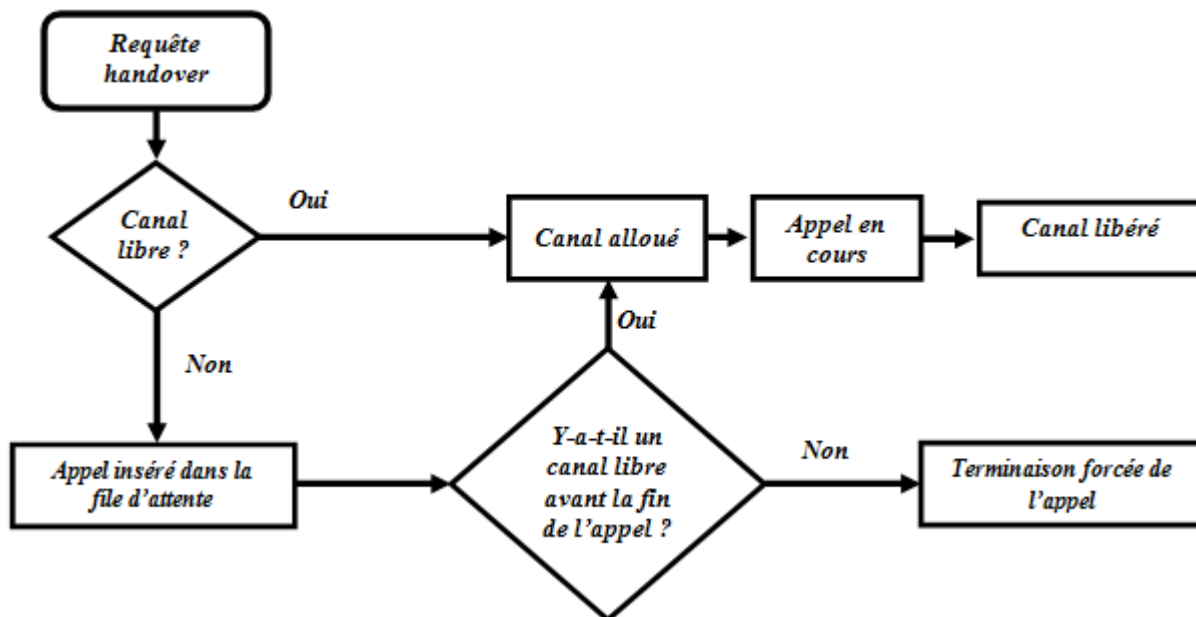


FIGURE 3.5 – Organigramme de la stratégie de mise en file d’attente des appels de handovers[74].

La mise en file d’attente des appels de handovers avec ou sans réservation de canaux de garde permet de minimiser la probabilité de blocage ou coupure des appels de handovers. En revanche, elle augmente la probabilité de blocage des nouveaux appels. Partant de ce constat, une autre technique a été proposée dans [77], [78], pour améliorer la technique *QPS (resp. QPS + GCS)* en terme de probabilité de blocage des nouveaux appels. Celle-ci permet à un nouvel appel qui trouve tous les canaux occupés (*resp. tous les canaux partagés occupés*) de rejoindre une file d’attente. Donc, cette technique détient deux files d’attente, une pour les appels de handovers et l’autre pour les nouveaux appels, voir la figure 3.6. Un nouvel appel (*resp. appel de handover*) est éliminé de la file d’attente quand il se déplace hors de la cellule (*resp. traverse la zone de handover*) avant d’obtenir un canal.

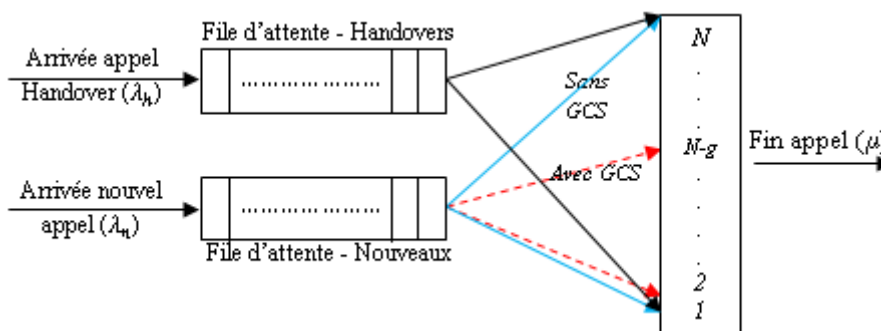


FIGURE 3.6 – Modèle de système avec priorité et mise en attente des appels de handovers et de nouveaux appels.

### 3.3.3 Stratégie de Sub-rating (SRS)

La stratégie **SRS** consiste à créer un nouveau canal dans le cas où la cellule ne dispose pas de canaux libres. Ce canal créé est obtenu en diminuant le débit d'un appel en cours. En effet, un canal plein-débit ou "full-rate" est temporairement divisé en deux canaux à demi-débit : un canal pour servir l'appel courant et un autre pour la requête de handover (voir la figure 3.7). Cette technique est réservée pour les appels urgents, les appels de maintenance et les appels prioritaires comme les requêtes de handovers. La technique **SRS** améliore la terminaison forcée de la communication. Cependant, elle introduit de la complexité au niveau de l'implémentation et dégrade la *QoS* des appels en cours [71].

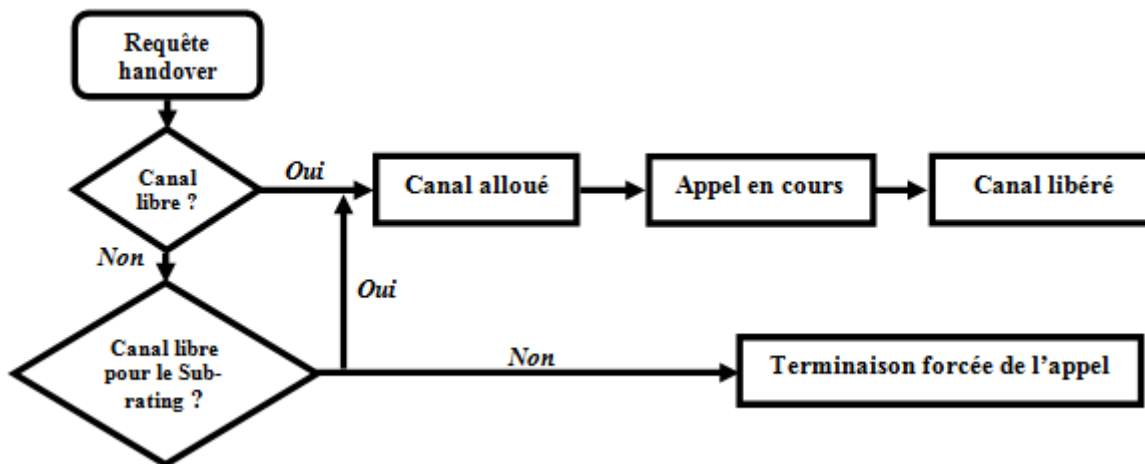


FIGURE 3.7 – Organigramme de la stratégie sub-rating (SRS) [74].

## 3.4 Aperçu bibliographique (Travaux relatifs)

Cette section présente un *overview* des travaux relatifs aux différents modèles analytiques de contrôle d'admission des appels (*CAC*) pour la favorisation des appels de handovers, proposés par la communauté des chercheurs dans la littérature. Nous nous contentons de présenter uniquement les différents travaux basés sur l'utilisation de la technique des canaux gardiens et ses dérivés. Ainsi, nous proposons une classification pour ces différents modèles analytiques en deux grandes catégories :

1. Modèles de *CAC* sans la prise en considération du phénomène de rappel.
2. Modèles de *CAC* avec la prise en considération du phénomène de rappel.

Nous proposons ensuite de classifier les modèles de chaque catégorie selon le nombre de classes de services pris en compte en : *modèles de CAC à classe de service unique* (une seule classe de service souvent des appels téléphoniques (2G)) et *modèles de CAC à classes de services multiples* (plusieurs classes de service : voix, donnée et vidéo (3G et 4G)). Et selon la stratégie d'allocation de canaux en *modèles de CAC avec une allocation statique* (allocation des canaux fixe pour toute la durée de vie du système) et *modèles de CAC avec une allocation dynamique* (l'allocation des canaux est faite périodiquement d'une façon dynamique suivant certains critères spécifiques au réseau).

### 3.4.1 Modèles de CAC sans la prise en considération du phénomène de rappel

Les modèles présentés dans cette section, étudient les performances des réseaux mobiles cellulaires en utilisant la technique de la réservation des canaux gardiens sans la prise en considération du phénomène de rappel des utilisateurs.

#### 3.4.1.1 Modèles de CAC à classe de service unique et allocation statique

##### a. Modèle de canaux gardiens avec la mise en file d'attente des nouveaux appels et des appels de handovers

*Chang et al.* dans [78], ont proposé un modèle de CAC dans les réseaux mobiles cellulaires basé sur une combinaison entre la technique de la réservation des canaux gardiens et celle de la mise en file d'attente des appels. Dans ce modèle, deux files d'attente (*buffers*) de capacité finie ont été utilisées, une dédiée pour l'attente des nouveaux appels de capacité égale à  $N_n$  et l'autre pour l'attente des appels de handovers de capacité égale à  $N_h$ , voir la figure 3.8. Pour modéliser la stratégie proposée, une chaîne de Markov à temps continu de deux dimensions a été utilisée, dans laquelle, un état est représenté par le couple  $(n_1, n_2)$ , tel que  $n_1$  représente la somme des canaux occupés et le nombre des appels de handovers en attente et  $n_2$  représente le nombre de nouveaux appels en attente dans le buffer.

$$\text{Tel que : } 0 \leq n_1 < C + N_n, 0 \leq n_2 < N_h.$$

Où :  $N_n$  correspond à la taille de buffer des nouveaux appels et  $N_h$  correspond à la taille de buffer des appels de handovers.

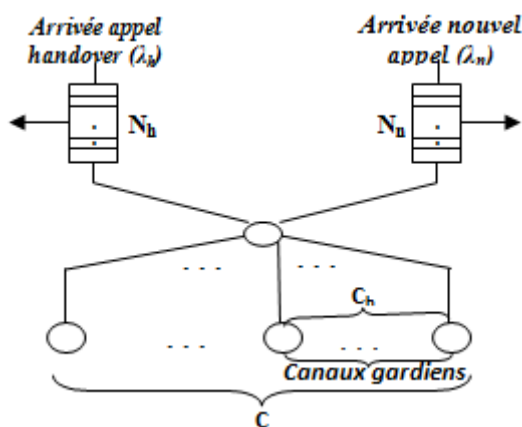


FIGURE 3.8 – Modèle de réservation des canaux gardiens avec mise en file d'attente des appels.

Les résultats ont montré que la mise en file d'attente des appels de handovers et des nouveaux appels avec réservation des canaux gardiens minimise significativement la probabilité de blocage des appels et augmente le trafic accepté dans la cellule.

##### b. Modèle de canaux gardiens fractionnels

*Ramjee et al.* dans [79], ont proposé et étudié un mécanisme de CAC dans les réseaux mobiles cellulaires, pour trois objectifs : (i) minimiser la probabilité de blocage des nouveaux appels et la probabilité de blocage des appels de handovers (*MINOBJ*), (ii) pour un certain nombre de canaux, minimiser la probabilité de blocage des nouveaux appels sous des contraintes dures sur la probabilité de blocage des appels de handovers (*MINBLOCK*), (iii) minimiser le nombre de canaux gardiens sous des contraintes dures sur les deux probabilités de blocage (*MINC*). Les

auteurs ont utilisé la technique de la réservation des canaux gardiens fractionnels et ils ont procédé par la comparaison de cette dernière avec celle des canaux gardiens classique. Une chaîne de Markov à temps continu a été utilisée pour modéliser l'évolution du système.

Les résultats ont montré que la technique des canaux gardiens classique est optimale pour *MINOBJ*, en revanche la technique des canaux gardiens fractionnels est optimale pour *MINBLOCK* et *MINC*. Aussi, le modèle de canaux gardiens fractionnels améliore significativement la probabilité de blocage des nouveaux appels de 20 à 50% par rapport au modèle de canaux gardiens classique pour le problème de *MINBLOCK* et cause une petite augmentation pour le problème *MINC*.

✓ Un modèle similaire basé sur l'utilisation de la technique de la réservation des canaux gardiens fractionnels a été proposé par *Vazquez-Avila et al.* dans [80].

#### 3.4.1.2 Modèles de CAC à classe de service unique et allocation dynamique

##### a. Modèle à réservation dynamique de canaux gardiens multi-niveaux

*Wong et al.* ont présenté dans [81], un modèle de favorisation des appels de handovers basé sur une réservation dynamique des canaux gardiens multi-niveaux, intitulé *multi-level dynamic guard channels (MLDGC)*. *MLDGC* adapte dynamiquement le nombre de canaux gardiens suivant la probabilité de coupure des appels de handovers dans une hiérarchie de  $k$  niveaux. Dans *MLDGC*, plus la probabilité de coupure des appels de handovers augmente, plus de niveaux sont ajoutés. Au niveau  $i$ , *MLDGC* fonctionne d'une façon similaire au fonctionnement du modèle de canaux gardiens classique avec une réservation fixe de canaux (*CGF*), avec un nombre de canaux gardiens  $CG_i$  supérieur au nombre de canaux gardiens  $CG_{i-1}$  de niveau  $i-1$ . Cependant, *MLDGC* diffère du modèle *CGF* quand il est déclenché pour passer au niveau supérieur (niveau  $i+1$ ) avec plus de canaux gardiens lorsqu'un échec d'un appel de handover se produit, faute de l'absence de canaux libres dans la cellule. Au niveau  $i+1$ , lorsque les canaux gardiens ne sont plus utilisés pendant toute une période du temps  $t$ , le modèle bascule automatiquement au niveau 1. Cette sémantique de fonctionnement se poursuit jusqu'à un maximum de  $k$  niveaux. Au  $K$ ième niveau, le nombre de canaux gardiens est  $CG_k$ , tels que  $CG_k > \dots > CG_{i+1} > CG_i > \dots > CG_1$ . Pour l'étude analytique de *MLDGC*, une chaîne de Markov bidimensionnelle à états finis a été utilisée. Un état est représenté par le couple  $(k, i)$ , où  $k$  représente le  $k$ -ième niveau du modèle *MLDGC* et  $i$  représente le nombre de canaux gardiens de ce niveau.

Les performances de *MLDGC* ne sont pas très différentes de celles de *CGF* sous des faibles charges du trafic réseau. Cependant, *MLDGC* est très efficace sous des charges du trafic réseau plus importante. Ainsi, la probabilité de coupure des appels de handovers dans ce cas, est largement inférieure à celle obtenue dans le modèle *CGF*.

##### b. Modèle à réservation dynamique des canaux gardiens et mise en file d'attente des appels de handovers

*Wang et al.* dans [74], ont proposé une stratégie de *CAC* basée sur une combinaison de la technique de la réservation des canaux gardiens et celle de la mise en file d'attente des appels de handovers, intitulé *Dynamic Guard Channel Scheme (DGCS)*. *DGCS* utilise une file d'attente (buffer) *FIFO* de taille finie, pour gérer les appels de handovers en attente d'un canal libre. Dans *DGCS*, le nombre de canaux gardiens est ajusté dynamiquement selon l'état d'occupation du buffer. Si le buffer est vide (voir la figure 3.9a),  $h$  ( $h \leq N$ ,  $N$  : nombre total de canaux) canaux

sont réservés exclusivement pour les appels de handovers, les  $n$  ( $n = N-h$ ) canaux restants sont destinés pour servir les nouveaux appels. Dans le cas où le buffer n'est pas vide,  $t$  canaux de plus sont réservés aux appels de handovers. Dans ce cas, le nombre de canaux gardiens  $h$  est modifié à  $h1 = (h+t)$  (voir la figure 3.9b). Un appel de handover en attente dans le buffer est terminé de force, si la SM quitte la zone de handover de la cellule.

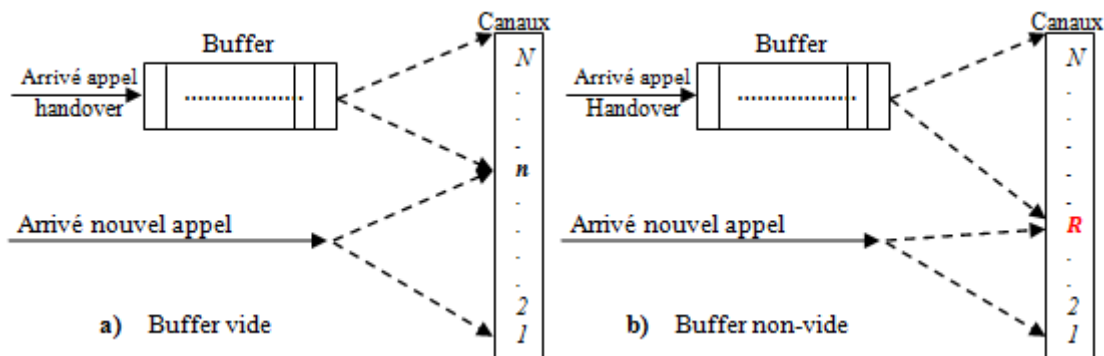


FIGURE 3.9 – Modèle à réservation dynamique des canaux gardiens et mise en file d’attente des appels de handovers.

Une chaîne de Markov à temps continu tridimensionnelle de deux niveaux a été utilisée pour modéliser *DGCS*. Dans cette chaîne, chaque état correspond au triplet  $(i, j, m)$ , tel que :  $i$  ( $0 \leq i \leq h1 + k$ ), représente les appels de handovers dans la file d’attente,  $j$  ( $0 < j < n$ ) représente les nouveaux appels dans le système, tous les deux sont représentés dans un état du système  $m$  ( $m = 1, 2$  (deux niveaux)).

Les résultats numériques ont montré que *DGCS* peut améliorer considérablement la probabilité de blocage des appels de handovers avec un léger effet négatif sur la probabilité de blocage des nouveaux appels. Aussi, la variation dynamique du nombre de canaux gardiens  $t$  permet de diminuer et d’équilibrer la probabilité de blocage globale des appels.

✓ Un autre modèle de réservation dynamique des canaux gardiens basé sur une architecture à deux couches (une couche de *Femto-cellule* avec une petite mobilité et une couche de *pico-cellule* avec une mobilité élevée) dans un réseau cellulaire *hiérarchique* a été proposé dans [82]. Les auteurs ont défini un *rapport* entre le nombre de canaux gardiens et le nombre total de canaux d’une cellule, après, ils ont procédé par l’étude de l’impact de la variation de ce rapport par rapport à la *QoS* du système dans les deux couches. Les auteurs ont déduit la conclusion suivante : l’utilisation d’un nombre optimal de canaux gardiens et l’ajustement dynamique de ce nombre, peut améliorer significativement la *QoS* dans le cadre d’un réseau cellulaire hiérarchique.

### 3.4.1.3 Modèles de CAC à classes de services multiples et allocation statique

#### a. Modèle de réservation des canaux gardiens avec deux seuils

*Beigy* et *Meybodi* dans [83], ont proposé un nouveau modèle de CAC avec canaux gardiens pour étudier les performances d’un réseau mobile cellulaire avec deux classes de services : les données ( $C1$ ) et la voix ( $C2$ ), intitulé, *dual-threshold reservation scheme (DTR)*. Dans *DTR*, l’ensemble des canaux d’une cellule est divisé en trois sous-ensembles en utilisant deux seuils  $T1$  et  $T2$  ( $0 < T1 \leq T2 \leq C$ ,  $C$  : le nombre total de canaux) : les canaux ordinaires (partagés par tout le monde, entre 0 et  $T1$ ), les canaux gardiens partagés (partagés par les appels de handovers des deux classes, entre  $T1$  et  $T2$ ) et les canaux gardiens dédiés (réservés exclusivement pour les

appels de handovers de type voix, entre  $T2$  et  $C$ ).  $DTR$  utilise le même nombre de canaux pour représenter chacun des deux classes d'appels :  $C1$  et  $C2$ . Le modèle de  $CAC$  de  $DTR$  est décrit par l'algorithme de suivant :

<p><b>Si</b> (nouvel appel) <b>alors</b>  <b>Si</b> (<math>c(t) &lt; T1</math>) <b>alors</b>  <i>Accepter appel,</i>  <b>Si non</b>  <i>Rejeter Appel,</i></p>	<p><b>Si</b> (appel de handover de <math>C1</math>) <b>alors</b>  <b>Si</b> (<math>c(t) &lt; T2</math>) <b>alors</b>  <i>Accepter appel,</i>  <b>Si non</b>  <i>Rejeter appel,</i></p>	<p><b>Si</b> (appel de handover de <math>C2</math>) <b>alors</b>  <b>Si</b> (<math>c(t) &lt; C</math>) <b>alors</b>  <i>Accepter appel,</i>  <b>Si non</b>  <i>Rejeter appel,</i></p>
--	--	---

Tel que,  $c(t)$  : représente le nombre de canaux occupés à l'instant  $t$ .

La cellule dans son état stable est modélisée par une chaîne de Markov à temps continu de quatre dimensions  $(n_{n1}, n_{h1}, n_{n2}, n_{h2})$ , tel que :  $n_{n1}, n_{h1}, n_{n2}$  et  $n_{h2}$  représentent le nombre de nouveaux appels de la classe  $C1$ , le nombre d'appels de handovers de la classe  $C1$ , le nombre de nouveaux appels de la classe  $C2$  et le nombre d'appels de handovers de la classe  $C2$ , respectivement.

Les résultats ont montré que la probabilité de blocage des appels de handovers de type voix est plus petite que celle des appels de handovers de type donnée et cette dernière est plus petite que celle des nouveaux appels.

✓ Une généralisation de ce modèle pour supporter plusieurs classes de services ( $N$  classes) a été plus tard proposée dans [84]. Le modèle est intitulé *multi-threshold guard channel (MTGC)*.  $MTGC$ , utilise une technique de canaux gardiens *multi-seuils*, dans laquelle, les canaux de chaque cellule sont divisés en  $N$  sous-ensembles en utilisant  $(N-1)$  seuils,  $T_1, T_2, \dots, T_{N-1}$  ( $0 < T_1 \leq T_2 \leq \dots \leq T_{N-1}$ ).  $MTGC$  suppose que les appels de la classe  $k+1$  sont plus prioritaires que ceux de la classe  $k$ . Pour la politique de  $CAC$  adoptée : Un appel de la classe  $k$  ( $k = 1, \dots, N$ ) est admis seulement lorsque le nombre de canaux occupés est inférieur au seuil  $T_k$ , dans le cas contraire, l'appel est bloqué et perdu pour toujours.

#### **b. Modèle de réservation des canaux gardiens multiples et trafic à classes de services multiples**

*Nasser* et *Hassanein* dans [85], ont présenté un modèle de  $CAC$  avec canaux gardiens multi-classes pour les services multimédias des réseaux mobiles cellulaires de prochaine génération, intitulé *Multi-Class Guard Channel Call Admission Control (MCGC-CAC)*.  $MCGC-CAC$  est considéré comme une extension et une généralisation de la technique de canaux gardiens classique pour plusieurs classes de service d'appels ( $k$  classes), avec des exigences différentes en terme de la  $QoS$  et de la bande passante pour chaque classe  $i$ . Dans  $MCGC-CAC$ , les appels avec des faibles besoins en terme de la bande passante sont plus prioritaires que ceux avec des besoins plus importants.

Dans la politique de contrôle d'admission utilisée par  $MCGC-CAC$ , une arrivée d'un nouvel appel est admise dans le système, si la somme de la quantité de la bande passante  $b_i$  demandée par cet appel plus la bande passante totale occupée par tous les appels en cours (nouveaux et handovers) de toutes les classes est inférieure ou égale à un certain seuil  $B_{Th}$  ( $0 < B_{Th} < B$ ). Tandis, qu'une arrivée d'un appel de handover de classe  $i$ , est admise dans le système, si la somme de la quantité de la bande passante  $b_i$  demandée par cet appel plus la bande passante totale occupée par tous les appels en cours (handovers et nouveaux) est inférieure ou égale à toute la capacité du système  $B$ . Les auteurs ont utilisé un processus de décision semi-Markovien

(*SMDP : Semi-Markov Decision Process*) pour représenter la politique de contrôle d'admission.

Les résultats numériques ont montré que *SMDP* est plus performant que les politiques de *CAC* existantes, car *MCGC-CAC* est capable d'atteindre des performances optimales avec une utilisation maximale de la bande passante et peut garantir une probabilité de blocage des appels de handovers toujours inférieure à un certain seuil spécifique pour chaque classe d'appel  $i$ .

### c. Modèle de réservation des canaux gardiens avec mise en file d'attente des appels de handovers et trafic à classes de services multiples

*Mukhopadhyay et al.* Dans [86], ont proposé un modèle de *CAC* pour les réseaux mobiles cellulaires de prochaine génération avec un trafic multi-classes (voix, vidéo et donnée) de deux types : trafic temps réel et trafic non temps réel, cela, en combinant la technique de la mise en file d'attente des appels et celle de canaux gardiens. Dans ce modèle, le trafic des appels non temps réels est inséré dans une file d'attente (buffer) *FIFO* de capacité finie. En quittant le buffer, ces appels entrent en compétition avec les appels temps réels pour accéder aux canaux partagés de la cellule. Le buffer possède un seuil  $Th$  (voir la figure 3.10), au-dessous de ce seuil le buffer est accessible pour tous les appels non temps réels (nouvel appel de donnée), au-dessus de ce seuil l'accès au buffer est réservé exclusivement pour les appels non temps réels prioritaires. Un nouvel appel non temps réel est accepté dans le buffer avec une certaine probabilité qui dépend de l'occupation du buffer. Dans ce modèle, l'ordre des priorités est le suivant : les appels vocaux suivis par les appels vidéos et en fin les appels de données. Aussi, les appels temps réels sont plus prioritaires que les appels non temps réels, un appel de handover vertical (inter-couche) est plus prioritaire qu'un appel de handover horizontal (intra-couche) et un appel de handover est plus prioritaire qu'un nouvel appel. Donc, les appels vocaux de handovers verticaux sont les plus prioritaires. Un appel inter-couche nécessite deux fois plus de canaux qu'un appel intra-couche et un appel vidéo nécessite quatre fois plus de canaux que les autres appels. Les appels de handovers verticaux en temps réels tels que la voix et la vidéo en temps réel ( $R$ ) et les appels de handovers verticaux non-temps réels tels que les données et la vidéo non-temps réel ( $N$ ) sont autorisés à accéder à tous l'ensemble des canaux de la cellule bien sûr par leurs ordre de priorité ( $R$  sont plus prioritaire que  $N$ ). Par contre les nouveaux appels et les appels non-temps réels ont uniquement le droit à accéder aux canaux partagés de la cellule. Les canaux gardiens sont réservés exclusivement pour les appels de handovers. Un modèle mathématique basé sur la distribution de type de phase (*PH*) a été proposé pour l'analyse du système et la matrice génératrice a été utilisé pour résoudre ce modèle.

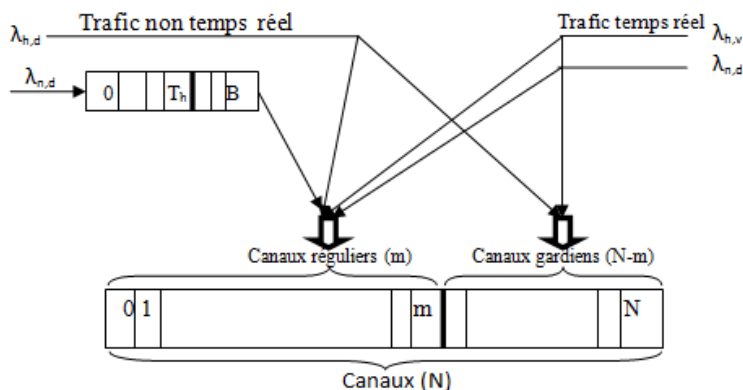


FIGURE 3.10 – Modèle de réservation des canaux gardiens avec mise en file d'attente des appels de handovers et trafic à classe de service multiple.

Les résultats ont montré que la probabilité de blocage du trafic temps réel est meilleure que celle du trafic non-temps réel, cela grâce à l'étape de la mise en buffer supplémentaire.

### 3.4.1.4 Modèles de CAC à classes de services multiples et allocation dynamique

#### a. Modèle de réservation dynamique des canaux gardiens partageables avec mise en file d'attente des appels et trafic à classes de services multiples

*Liu* et *Guo* Dans [87], ont proposé un nouveau modèle de CAC basé sur une allocation dynamique de canaux et le partage des canaux gardiens entre les deux classes de services : la voix et les données, intitulé, *shared data guard-channel (SDGC) scheme*. Dans *SDGC*, le nombre de canaux gardiens est ajusté périodiquement d'une manière dynamique en fonction de la probabilité de blocage des nouveaux appels et celle de blocage des appels de handovers. *SDGC* utilise une combinaison entre la technique des canaux gardiens et celle de la mise en file d'attente des appels (nouveaux et handovers). *SDGC* réserve une partie  $g$  de l'ensemble de canaux  $C$  d'une cellule, pour les appels de handovers. Ces canaux gardiens sont divisés en deux parties : une partie réservée exclusivement pour les appels de handovers de type voix et l'autre partie partagée entre les appels de handovers de type voix et ceux de type données, sachant que les appels vocaux sont les plus prioritaires. Les autres  $C-g$  canaux restants sont partagés entre les appels vocaux et les appels de données. Une arrivée d'un appel vocal (*resp.* de donnée) qui ne trouve aucun canal libre est insérée dans une file d'attente (buffer) *FIFO* de taille  $B_v$  (*resp.*  $B_g$ ), voir la figure 3.11. Un nouvel appel (*resp.* un appel de handover) en attente dans le *buffer* peut renoncer au service après une certaine période de temps finie (le cas d'un abonné impatient).

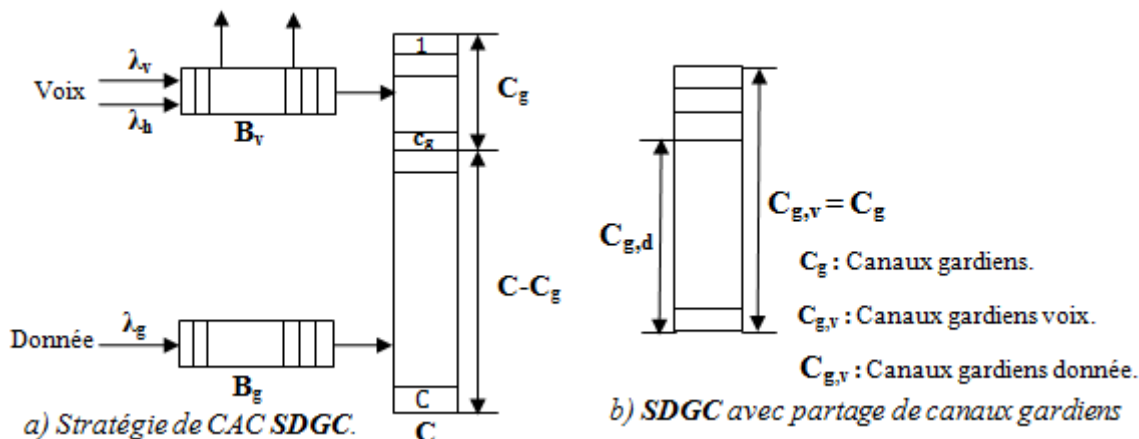


FIGURE 3.11 – Modèle de réservation dynamique des canaux gardiens partageables avec mise en file d'attente des appels et trafic à classe de service multiple.

#### b. Modèle de réservation dynamique de canaux de multi-garde et trafic à classes de services multiples

*Yang* et *al.* Dans [88], ont proposé une stratégie de CAC adaptative basé sur une technique de canaux gardiens multiples pour un trafic à plusieurs classes de service (voix, vidéo et donnée) pour les réseaux mobiles cellulaires multimédias, intitulé *adaptive multiguard channel scheme (AMGCS)*. Les auteurs de cet article ont considéré un système avec  $K$  classes de service et deux types d'arrivées des appels pour chaque classe du trafic ( $C_i$ ) : les nouveaux appels et les appels de handovers. Les canaux libres dans chaque cellule sont divisés en  $i+1$  régions via des seuils  $T_i$  ( $T_1$  à  $T_i$ ). Un seuil  $T_i$  représente la frontière entre les canaux partagés et les canaux

gardiens de la classe du trafic  $C_i$ . Dans *AMGCS*, un appel de handover d'une classe  $C_i$  peut accéder aux canaux se trouvant entre les deux seuils  $T_{i+1}$  et  $T_{i+2}$  ( $1 \leq i < k$ ) avec une certaine probabilité déterminée en fonction de la mobilité du terminal et l'occupation du canal. L'ordre des priorités du trafic des classes est selon l'indice  $i$  ( $C_1$  correspond à la plus petite priorité,  $C_k$  correspond à la plus grande priorité). Dans *AMGCS*, les appels de handovers sont plus prioritaires que les nouveaux appels pour la même classe du trafic, tandis qu'un appel de handover de petite priorité a exactement la même opportunité d'accès aux canaux gardiens qu'un nouvel appel de grande priorité. Aussi, pour ajuster les frontières entre les canaux de multi-garde, deux nouveaux paramètres d'adaptation de seuils ( $\varphi_i$  et  $\gamma_i$ ) ont été introduit. ( $\varphi_i$  et  $\gamma_i$ ) représentent la probabilité d'admission des appels de handovers et de nouveaux appels propre à la classe du trafic  $C_i$ , respectivement.  $\varphi_i$  doit être supérieur à  $\gamma_i$  à cause de la grande priorité des appels de handovers. Si  $\varphi_i = 1$ , tous les canaux disponibles peuvent être utilisés par les appels de handovers.

Les résultats ont montré qu'en plaçant convenablement les paramètres du seuil adaptatifs ( $\varphi_i$  et  $\gamma_i$ ), cette stratégie de CAC peut fournir de très bonnes performances, cela en s'adaptant aux différents changements de la charge du trafic.

✓ Une amélioration de ce modèle a été plus tard proposée dans [89], avec cette fois l'utilisation d'un seul paramètre d'adaptation  $\theta_i$  pour ajuster les frontières entre les différents canaux de multi-garde. Ce paramètre représente la probabilité pour laquelle un appel de handover de la classe du trafic  $C_i$  peut accéder aux canaux gardiens de la classe du trafic  $C_{i+1}$ .

#### 3.4.1.5 Critique des modèles de CAC sans la prise en considération du phénomène de rappel

Les différents modèles analytiques de *CAC* présentés auparavant permettent d'améliorer la *QoS* des réseaux mobiles cellulaires en utilisant la technique des canaux gardiens et ces dérivés. Cependant, ces modèles ignorent le phénomène très habituel de rappel des abonnés bloqués. Cela, peut s'avérer comme décision réfutable lors de l'étude des performances des réseaux mobile cellulaire et peut sérieusement affecter la crédibilité des résultats obtenues, vu l'important impact négatif [1] que représente ce phénomène sur la *QoS* du système et l'augmentation du trafic généré dans la cellule. C'est la raison pour laquelle, ce phénomène a attiré beaucoup d'attention dans le domaine de la recherche et une panoplie de travaux a été proposée dans la littérature, dont quelques uns sont cités dans la section suivante.

### 3.4.2 Modèles de contrôle d'admission avec la prise en considération du phénomène de rappel

Les modèles présentés dans cette section, étudient les performances des réseaux mobiles cellulaires en utilisant la technique de la réservation des canaux gardiens avec la prise en considération du phénomène de rappel des utilisateurs.

#### 3.4.2.1 Modèles de CAC à classe de service unique et allocation statique

##### a. Modèle avec réservation d'un seul canal gardien et rappel des nouveaux appels

*Tran-Gia* et *Mandjes* dans [1], ont étudié l'impact du phénomène de rappel sur la *QoS* dans un réseau mobile cellulaire homogène : *GSM*, par le biais de deux modèles de CAC avec rappel différents l'un de l'autre :

**A. Le modèle (A) :** ce modèle présente un mécanisme de *CAC* avec rappel, qui considère une *SB* avec une population *finie* de taille  $K$  ( $K > N$ ,  $N$  : le nombre total de canaux d'une cellule ( $N \geq 2$ )), des canaux homogènes et un seul flux d'arrivée des appels (les arrivées des nouveaux appels uniquement). Dans ce modèle, les appels arrivent suivant un processus quasi-aléatoire de taux égal à  $\lambda_F$ . Un appel bloqué à cause de l'indisponibilité de canaux libres entre dans une orbite virtuelle afin de rappeler le service avec une probabilité  $\Theta$ , ou quitte le système avec une probabilité  $1-\Theta$ , Voir la figure 3.12. Pareil dans les deux modèles ((A) et (B)), les appels bloqués en attente dans l'orbite rappellent le service suivant une distribution exponentielle de taux égal à  $\alpha_0$  et la durée moyenne de la communication est modélisée par une distribution exponentielle de taux égale à  $\mu$ .

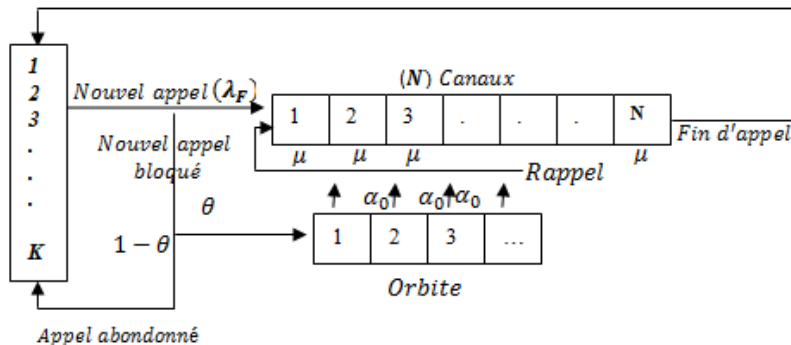


FIGURE 3.12 – Mécanisme de *CAC* avec rappel, population finie et canaux homogènes.

Les résultats de l'étude expérimentale du modèle (A) ont montré qu'il est très facile de passer à une population *infinie*, en prenant de grande valeur de  $K$ . Dans ce cas, les performances du système sont plus mauvaises que celles dans le cas d'une population *finie*.

**B. Le modèle (B) :** ce modèle présente un mécanisme de *CAC* avec rappel, qui considère une *SB* avec une population d'abonnés *infinie* et deux flux d'arrivées : les arrivées de nouveaux appels et les arrivées des appels de handovers. Aussi, la technique de canaux gardiens avec réservation d'un seul canal a été utilisée pour favoriser les appels de handovers, les  $(N-1)$  canaux restants sans partagés entre les nouveaux appels et les appels de handovers. Dans ce modèle, une arrivée d'un nouvel appel est servie immédiatement s'il y a au moins un canal libre parmi les  $N-1$  canaux partagés. Dans le cas contraire, l'appel est bloqué et il va rejoindre une orbite virtuelle avec une probabilité égale à  $\Theta$  ou quitte le système définitivement avec une probabilité égale à  $1-\Theta$ . Une arrivée d'un appel de handover qui trouve au moins un canal libre est servie immédiatement. Dans le cas contraire, l'appel est bloqué et perdu pour toujours, voir la figure 3.13.

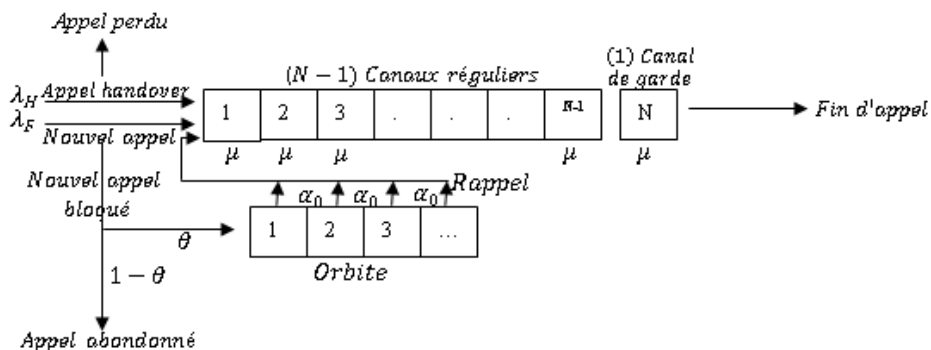


FIGURE 3.13 – Mécanisme de *CAC* avec rappel et réservation d'un seul canal gardien.

Pour la modélisation de ce système de *CAC*, une chaîne de Markov à temps continu (*CMTC*) a été utilisée. L'état de la cellule à l'instant 't' est décrit à l'aide du processus  $\{Y, Z\}$  où  $Y$  est le nombre de canaux occupés, et  $Z$  est le nombre d'appels en attente dans l'orbite.

Les auteurs de cet article, ont ensuite proposé un nouvel algorithme semi-récurif pour calculer les probabilités d'états. Le but de cet algorithme, en premier lieu, est d'exprimer d'états  $x(i, j)$  en fonction des deux coefficients  $K_0$  et  $K_1$ , cela en se basant sur les différentes équations de flux d'entrée-sortie tel que :

$$x(i, j) = K_0\mu_0(i, j) + K_1\mu_1(i, j).$$

Ensuite, toutes les probabilités ont été exprimées en fonction de  $K_0$  seulement, cela en procédant par l'élimination de  $K_1$  en utilisant une relation entre  $K_0$  et  $K_1$ . Ainsi,  $K_0$  reste le seul inconnu et les probabilités d'états deviennent :

$$x(i, j) = k_0U(i, j) \text{ avec, } U(i, j) = \mu_0(i, j) + \left(\frac{K_1}{K_0}\right)\mu_1(i, j).$$

Après, l'équation de normalisation a été utilisée pour calculer  $K_0$  et le calcul final des probabilités d'états a été effectué de manière récursive, en substituant la valeur de  $K_0$  dans toutes les équations.

Cet algorithme a fait l'objet d'une amélioration dans [90], pour le cas d'un grand nombre de canaux.

Les résultats de l'étude expérimentale du modèle (*B*) ont montré que l'utilisation de la technique de canaux gardiens permet d'améliorer significativement la probabilité de blocage des appels de handovers, autant qu'elle augmente celle de blocage de nouveaux appels et diminue le trafic accepté dans la cellule. Aussi, la réservation d'un petit nombre de canaux de garde (au maximum deux canaux) est largement suffisante pour améliorer la *QoS*. D'autre part, les auteurs ont terminé par la conclusion suivante : la prise en considération du phénomène de rappel lors de l'étude des performances des réseaux cellulaires semble être primordiale vu l'important effet négatif que représente ce phénomène sur les performances du réseau, surtout sur la probabilité de blocage des appels et l'augmentation de la charge du trafic dans la cellule.

#### Critique

Dans cet article, les auteurs ont opté pour la réservation d'un seul canal gardien, cela semble suffisant dans le cas d'un réseau à faible mobilité, mais risque d'être insuffisant dans le cas d'un réseau à forte mobilité où les handovers sont très fréquents. Aussi, les modèles de *CAC* avec rappel proposés ne se souciaient pas de nombre d'appels acceptés dans la cellule et ne fournissaient aucun mécanisme pour améliorer la probabilité de blocage des nouveaux appels.

✓ Beaucoup d'améliorations [92], [91] et de propositions des stratégies de *CAC* basées sur ce travail [1] ont été proposées par la suite, dans ce qui suit nous citons quelques uns de ces travaux.

### b. Modèle de réservation des canaux gardiens avec rappel des nouveaux appels et mise en file d'attente des appels de handovers bloqués

Le modèle proposé par *Choi et al.* dans [93], est considéré comme une amélioration du modèle de *Tran-Gia et Mandjes*[1], avec comme principale contribution la mise en file d'attente des appels de handovers bloqués. En effet, une arrivée d'un appel de handover qui trouve tous les canaux occupés, est insérée dans une file d'attente de capacité finie et politique de service prioritaire, s'il ya toujours de la place vide dans cette file, sinon l'appel est perdu pour toujours. Un appel de handover en attente dans la file d'attente prioritaire peut quitter le système sans être servi après un temps fini, si la station mobile quitte la zone de handover ou dans le cas où la qualité du signal se dégrade sous un certain seuil. Dans ce modèle, les nouveaux appels et les appels de handovers arrivent suivant un processus de Markov MAP (Markov Arrival Process), indépendamment les uns des autres. Pour l'étude analytique, la file d'attente avec rappel *MAP1*, *MAP2 / M / c / b, ∞* a été utilisé, voir la figure 3.14.

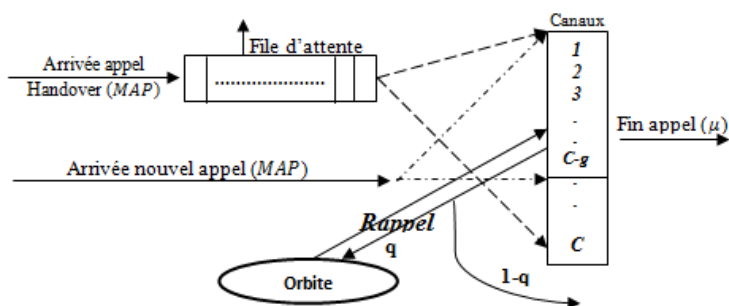


FIGURE 3.14 – Réservation des canaux gardiens avec rappel des nouveaux appels et mise en file d'attente des appels de handovers bloqués.

Les résultats ont confirmé ceux de [1]. De plus, la mise en file d'attente des appels de handovers permet d'apporter une amélioration de plus à la probabilité de blocage des appels de handovers.

#### Critique

Ce modèle permet d'améliorer considérablement la probabilité de blocage des appels de handovers (via la réservation des canaux gardiens et la mise en file d'attente des appels de handovers). Mais, en contre partie augmente la probabilité de blocage des nouveaux appels, ce qui risque de diminuer le trafic accepté dans le système.

✓ Un mécanisme de *CAC* avec rappel similaire a été proposé dans [95], avec cette fois l'utilisation d'une combinaison entre la technique de la mise en file d'attente des appels de handovers bloqués et celle de la réservation des canaux gardiens fractionnels.

### c. Modèle de réservation des canaux gardiens avec rappel des nouveaux appels et rappel des appels de handovers

*Marsan et al.* Dans [94], ont proposé et étudié un nouveau modèle de favorisation des appels de handovers dans les réseaux mobiles cellulaires, basé sur la technique de la réservation des canaux gardiens avec cette fois la prise en considération du rappel des nouveaux appels bloqués et celui des appels de handovers bloqués dans le cas d'une cellule avec une population d'abonnés *finie* et le cas d'une cellule avec une population d'abonnés *infinie*. La principale contribution proposée dans ce travail, est la prise en considération du rappel des appels de

handovers en transit échoués. Donc, une arrivée d'un appel de handover qui trouve tous les canaux occupés est bloquée et va rejoindre une orbite pour rappeler le service après un certain temps fini. Un nouvel appel bloqué (si tous les canaux partagés sont occupés) ou un appel de handover bloqué (si tous les canaux sont occupés) doit rappeler le service au moins une fois. Dans le modèle proposé, les auteurs ont utilisé deux orbites dédiées pour accueillir chaque type d'appels (nouveaux et handovers) et un abonné en attente dans l'orbite peut devenir impatient au bout d'un certain temps fini.

Pour l'étude de performance de ce modèle, les auteurs ont utilisé une chaîne de Markov à temps continu *CMTC*. Un état du système à l'instant  $t$  est décrit par un vecteur  $E = (i, b_n, b_h)$  où :

- $i$  : représente le nombre d'appels actifs dans la cellule  $0 \leq i \leq N$  (où  $N$  est le nombre de canaux dans la cellule) ;
- $b_n$  : représente une variable booléenne dans l'ensemble  $\{0, 1\}$  qui indique la présence ou non des nouveaux appels bloqués dans l'orbite associé.
- $b_h$  : représente une variable booléenne dans l'ensemble  $\{0, 1\}$  qui indique la présence ou non des appels de handovers bloqués dans l'orbite associé.

Les résultats numériques ont montré que les plus petites tailles de la population améliorent les performances du système, ainsi, pour une probabilité de blocage donnée, la quantité du trafic accepté dans le réseau varie significativement selon la taille de la population. Aussi, la prise en considération du rappel des appels de handovers bloqués peut apporter une amélioration de plus pour les performances du réseau spécialement pour la probabilité de blocage des appels de handovers.

#### Critique

La mise en œuvre de la mise en file d'attente des appels de handovers est une procédure délicate qui dépend de divers paramètres tels que la vitesse de déplacement du terminal mobile, la qualité du signal et le temps d'attente. Selon l'estimation de ce modèle, le système ne tient compte que de l'indicateur global sur l'existence ou non des appels dans leur orbites associés sans se soucier des autres paramètres tels que le nombre moyen des appels et la vitesse du déplacement. Aussi, le système ne fournit aucun mécanisme pour améliorer la probabilité de blocage des nouveaux appels.

✓ Un modèle similaire a été proposé dans [102], basé sur une utilisation de la technique de la réservation des canaux gardiens avec rappel des nouveaux appels bloqués et rappel des appels de handovers bloqués, dans le cas d'une population infinie.

✓ Une extension du modèle de *Marsan et al.* a été proposé par *ROSZIK* et *SZTRIK* dans [97], avec comme principale nouveauté présentée dans cet article, c'est que non seulement les appels actifs (en cours), mais aussi les appels en attente dans l'orbite (les nouveaux appels bloqués et les appels de handovers bloqués) sont tous autorisés à quitter la cellule vers d'autres cellules adjacentes avec une meilleur *QoS* après un certain temps aléatoire. Aussi, l'outil *MOSEL (Modeling, Specification and Evaluation Language)* a été utilisé pour le calcul numérique des probabilités d'états stationnaires.

✓ Un autre modèle similaire a été proposé par *Zhou et Zhu* dans [96], toujours en utilisant la technique de la réservation des canaux gardiens avec la prise en considération du rappel des nouveaux appels et celui des appels de handovers bloqués. La principale contribution apportée dans ce travail, c'est que l'orbite est à politique de service *FIFO*, *i.e.* seulement les appels se

trouvant au sommet de la file d'attente de l'orbite sont autorisés à rappeler le service, en revanche le modèle ne considère pas les clients impatientes. Aussi, les auteurs ont proposé un nouveau modèle de file d'attente avec rappel ( $MAP1, MAP2$ )/ ( $PH1, PH2$ )/  $N$ , avec la généralisation des processus d'arrivées des appels aux différents flux d'entrée de type processus de Markov  $MAP$  ( $MAP$  : *Markov Arrival Process*) et une prolongation du temps exponentiel d'occupation du canal aux différentes distributions communes de type de phase ( $PH$  : *phase type distributions*). La matrice analytique a été utilisée pour le calcul des probabilités d'états. Les résultats de comparaison entre le modèle de file d'attente proposé et celui de la file d'attente  $M/M/N$  ont montré que la considération du flux d'arrivée de type Poisson et de temps d'occupation du canal de type exponentiel peuvent causer des erreurs significatives lors de l'évaluation de performances des réseaux mobiles cellulaires. D'autre part, le modèle considère une orbite à politique de service  $FIFO$  et ne supporte pas les clients impatientes, cela contrarie le comportement naturel des abonnés où le rappel est aléatoire et l'abonné ne rappelle pas le service indéfiniment.

#### d. Réserveation des canaux gardiens avec rappel des nouveaux appels et faible priorité des appels de handovers

*Artalejo* et *Lopez-Herrero* dans [98], ont étudié les performances d'un réseau mobile cellulaire dans un environnement aléatoire en utilisant une méthode basée sur la matrice analytique. Pour la favorisation des appels de handovers, les auteurs ont utilisé la technique de la réserveation des canaux gardiens avec rappel et ils ont adopté la proposition de *Tran-Gia* et *Mandjes* dans [1], qui suppose que la réserveation d'un seul canal gardien par cellule est suffisante pour améliorer la qualité de service du système. Ainsi, ils ont proposé et comparé deux politiques de réserveation de canaux gardiens :

- A. Une nouvelle politique qui accorde une faible priorité aux appels de handovers, de manière à ce que tous les canaux puissent être utilisés par les nouveaux appels et les appels de handovers, mais, à tout moment  $t$ , au moins un canal doit être à la disposition des appels de handovers. Ce qui revient à dire, qu'un nouvel appel est bloqué s'il trouve  $C-1$  canaux occupés par d'autres nouveaux appels, où  $C$  représente le nombre total des canaux d'une cellule.
- B. La proposition de [1], où un seul canal est réservé exclusivement pour les appels de handovers. Par conséquent, un nouvel appel est bloqué s'il trouve  $C-1$  canaux occupés, quelque soit le type d'appels occupants ces canaux (nouvel ou handover).

Un nouvel appel bloqué va rejoindre une orbite pour réessayer de rappeler le service après un temps fini. En revanche, un appel de handover qui trouve tous les canaux occupés sera bloqué et perdu pour toujours. Le modèle ne supporte pas les clients impatientes.

Dans ce modèle, les auteurs ont considéré deux types de flux d'arrivée : une population finie de nouveaux appels de taille  $K$  ( $k < C$ , générée à l'intérieur de la cellule) et une population de taille infinie des appels de handovers en transites. Le comportement du modèle dépend de l'état des conditions de l'environnement et il est représenté à l'instant  $t$  par une chaîne de Markov à temps continu irréductible de quatre dimensions,  $X = \{(F_t, H_t, O_t, E_t); t \geq 0\}$ , tel que :

- $F_t$  et  $H_t$  : représentent le nombre de canaux occupés par les nouveaux appels et les appels de handovers, respectivement.
- $O_t$  : représente le nombre de nouveaux appels dans l'orbite.
- $E_t$  : représente l'état de l'environnement à l'instant  $t$ .

L'espace d'état est donné par :

$$S = \{(i, j, k, m), 0 \leq i \leq C - 1, 0 \leq j \leq C - i, 0 \leq k \leq K - i, 0 \leq m \leq M\}.$$

Les résultats numérique ont montrés que :

- Les changements de l’environnement ont une influence significative sur le taux d’arrivée moyen des appels de handovers, le taux moyen des appels en attente et la probabilité de blocage des appels de handovers.
- La technique des canaux gardiens utilisée dans le modèle **(A)** a un léger effet négatif sur le nombre moyen des canaux occupés et la probabilité de blocage des nouveaux appels.
- Les résultats de comparaison des deux politiques de *CAC* avec rappel et canaux gardiens **(A)** et **(B)** ont montré que le plus grand nombre d’appels acceptés dans la cellule correspond à la politique **(A)** avec la faible priorité des appels de handovers.

**Critique**

La contribution de cet article est fondée sur la disponibilité d’un seul canal gardien à tous moment  $t$ , cela risque d’être insuffisant surtout dans le cas de forte mobilité des abonnés où les handovers sont très fréquents. Aussi, le modèle proposé ne supporte pas les clients impatientes ce qui contrarie le comportement naturel des abonnés (un abonné ne rappelle pas le service indéfiniment).

**e. Modèle de réservation des canaux gardiens fractionnels (FGC) avec rappel des nouveaux appels et rappel des appels de handovers**

L’auteur de [99] a proposé un nouvel algorithme rapide et précis pour évaluer les performances du phénomène de rappel dans un réseau mobile cellulaire, en appliquant une stratégie de *CAC* basée sur la technique de la réservation des canaux gardiens fractionnels *FGC* (*Fractional Guard Channel*). Dans ce modèle, une seule orbite est utilisée pour accueillir les nouveaux appels et les appels de handovers bloqués. Aussi, le modèle ne fait pas de différence entre le rappel d’un nouvel appel bloqué et celui d’un appel de handover bloqué. D’autre part, un nouvel appel ou un rappel d’un nouvel appel est accepté avec une probabilité  $\beta_i$  et un appel de handover est accepté avec une probabilité égale à 1. Une file d’attente avec rappel a été utilisée pour modéliser le mécanisme de *CAC* avec rappel et abonnés impatientes, voir la figure 3.15. Une chaine de Markov à temps continu bidimensionnelles a été proposée pour l’étude des performances de cette file. Un état du système à l’instant  $t$  est représenté par le couple  $(I(t), J(t))$ , tel que  $I(t)$ ,  $0 \leq I(t) \leq C$  représente le nombre de canaux occupés et  $J(t)$ ,  $0 \leq J(t)$  représente le nombre des appels (nouveaux et handovers) en attente dans l’orbite.

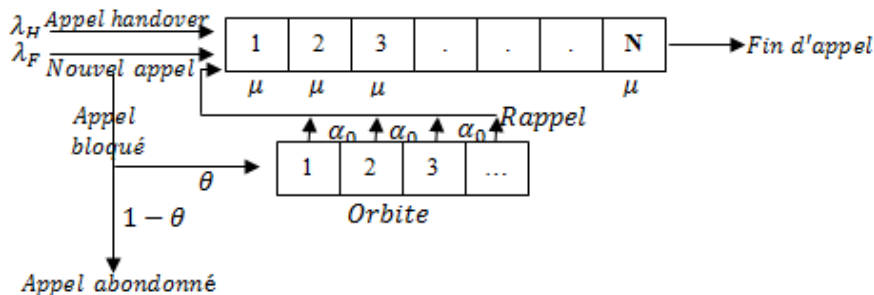


FIGURE 3.15 – Modèle de file d’attente avec rappel.

**Critique**

Le modèle proposé ne fait pas la différence entre un rappel d’un nouvel appel et celui d’un appel de handover, ce qui affaiblit la priorité des appels de handovers et risque d’augmenter leur

probabilité de blocage.

✓ Un modèle similaire qui utilise la technique de la réservation des canaux gardiens fractionnels avec rappel a été proposé dans [100]. Dans ce modèle, les auteurs considèrent deux types de rappels avec une orbite dédiée pour chacun d'entre eux : le rappel d'un nouvel appel bloqué et *le rappel automatique* d'un appel de handover bloqué. Ce nouveau concept est spécifique aux réseaux mobiles cellulaires modernes, où un appel de handover bloqué réessaie de rappeler le service d'une manière automatique jusqu'à l'aboutissement de l'appel ou jusqu'à que la SM se déplace en dehors de la zone de handover. La différence entre le rappel des nouveaux appels (la recomposition des abonnés patients) et le rappel automatique des appels de handovers est que le premier est généré par un comportement aléatoire dû à l'être humain et dépend de la persévérance de l'abonné, et le deuxième est un phénomène déterministe généré par une composante matérielle du système.

### 3.4.2.2 Modèles de CAC à classes de services multiples et allocation statique

#### a. Modèle de réservation des canaux gardiens avec rappel et trafic multi-classes

*Dharmaraja* et *al.* dans [101], ont proposé un modèle analytique pour étudier les performances d'un réseau mobile cellulaire homogène 3G, basé sur la technique des canaux gardiens avec rappel. Le modèle proposé supporte les appels à classe de services multiples de types : voix, vidéo et donnée. Dans ce modèle, un seul canal est alloué pour les appels vocaux et de données et quatre canaux sont alloués aux appels vidéo. Les appels de type vidéo sont divisés en deux groupes : les appels vidéo (*vo1*) qui nécessitent une grande qualité de service (la vidéo en direct) et les appels vidéo (*vo2*) qui nécessitent une petite qualité de service (la vidéo à la demande).

Dans ce travail, un nombre fixe de canaux gardiens  $g$  est réservé pour chaque type d'appels. Le modèle de *CAC* proposé attribue la plus grande priorité aux appels vocaux suivis par les appels vidéos de type *vo1*, après vient les appels vidéos de type *vo2* et en dernier les appels de données. Aussi, les appels de handovers sont plus prioritaires que les nouveaux appels. Les arrivées des nouveaux appels de type : voix, *vo2* et donnée et les arrivées des appels de handovers de type : *vo2* et donnée sont bloqués et vont rejoindre une orbite, pour réessayer de rappeler le service plus tard, dans le cas où il n'y a pas suffisamment de canaux libres pour les servir. Une arrivée d'un appel de handover de type voix ou *vo1* ou l'arrivée d'un nouvel appel de type *vo1* est bloquée et perdue pour toujours, dans le cas où il n'y a pas de canaux libres pour la servir. La matrice génératrice infinitésimale est utilisée pour calculer les probabilités à l'état stationnaire.

## 3.5 Synthèse récapitulative

D'après l'étude des différents modèles analytiques de *CAC* basés sur l'utilisation de la technique de la réservation des canaux gardiens, nous avons pu déduire les points suivants :

- L'utilisation de la technique de la réservation des canaux gardiens peut améliorer significativement la probabilité de blocage des appels de handovers, autant qu'elle augmente la probabilité de blocage des nouveaux appels et diminue le trafic accepté dans la cellule.
- La plupart des modèles de *CAC* basés sur l'utilisation de la technique des canaux gardiens ne fournissent pas de mécanismes pour améliorer la probabilité de blocage des nouveaux appels.
- L'utilisation d'un nombre optimal de canaux gardiens et l'adaptation dynamique de ce nombre selon l'état du système donnent des performances meilleures que dans le cas de

l'utilisation d'une allocation statique des canaux.

- La prise en considération du trafic à classes de services multiples (voix, données, vidéo) semble inévitable dans l'évaluation des performances des réseaux mobiles cellulaires modernes (3G et 4G), vues les spécifications de ces réseaux.
- La prise en considération du phénomène de rappel lors de l'étude des performances des réseaux mobiles cellulaires est primordiale, vu l'important effet négatif qu'il représente sur les performances du réseau. Cela a été bien démontré dans tous les travaux qui considèrent des modèles de *CAC* avec rappel, présentés auparavant.
- Les performances du système sont meilleurs si on considère une cellule avec population finie que dans le cas où on considère une cellule avec population infinie.
- Malgré l'existence d'un nombre intéressant de travaux qui étudient l'impact du phénomène de rappel sur les performances des réseaux mobiles cellulaires avec une seule classe de service (appels téléphoniques) et une allocation statique de canaux, nous avons constaté une absence totale de travaux qui considèrent le phénomène de rappel avec une allocation dynamique de canaux et un trafic à classes de services multiples.

## 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art et une classification des différentes stratégies de *CAC* basées sur l'utilisation de la technique des canaux gardiens et ses dérivés.

D'après l'étude des différentes stratégies de *CAC* avec canaux gardiens, nous avons remarqué que les différentes méthodes proposées améliorent largement la probabilité de blocage des appels de handovers, autant qu'elles augmentent la probabilité de blocage des nouveaux appels et diminuent le trafic accepté dans une cellule. C'est pourquoi, nous avons pensé à introduire des mécanismes supplémentaires pour réduire la probabilité de blocage des nouveaux appels et maximiser l'utilisation du canal. Aussi, la prise en considération du phénomène de rappel des utilisateurs lors de l'étude des performances des réseaux mobiles cellulaires semble indispensable, vu l'énorme effet négatif que présente ce phénomène sur les performances du réseau et sa qualité de service.

Partant de ce constat, nous proposons dans la suite de ce mémoire un nouveau modèle de *CAC* avec rappel pour les réseaux *SCNs* (*Small Cell wireless Networks*), basé sur l'utilisation de la technique des canaux gardiens et une priorité pour le rappel des nouveaux appels bloqués, à l'aide du formalisme des *RDPSG* (*réseaux de Petri stochastiques généralisés*). Cette priorité est exprimée via un nouveau concept dit *d'emprunt des canaux gardiens*, qui permet à un nouvel appel bloqué d'emprunter temporairement un canal gardien non occupé.

## CHAPITRE 4

# MODÉLISATION ET ÉVALUATION DES PERFORMANCES DES STRATÉGIES DE CONTRÔLE D'ADMISSION AVEC RAPPEL ET CANAUX GARDIENS DANS LES RÉSEAUX *SCNS*.

### 4.1 Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les mécanismes de contrôle d'admission des appels (*Call Admission Control CAC*) dans les réseaux mobiles cellulaires plus précisément la technique des canaux gardiens, suggère une réservation d'un nombre de canaux pour les appels de handovers, ce qui garantit une faible probabilité de coupure aux communications déjà établies. Cependant, cette uniformité ne tient pas compte du trafic qui peut exister dans une cellule, et engendre à la fois une augmentation du blocage des nouvelles communications et une perte du trafic offert. Pour cela, d'autres mécanismes complémentaires doivent être ajoutés pour remédier à ce problème. D'autre part, la prise en considération du phénomène de rappel des abonnés lors de l'étude des performances des réseaux mobiles cellulaires semble primordiale, vu l'énorme effet négatif que présente ce phénomène sur les performances du système.

Par ailleurs, les *SCNs* (*Small Cell Wireless Networks*) représentent un nouveau paradigme de gestion des réseaux mobiles cellulaires, dont l'objectif principal est l'augmentation de la capacité du réseau. Ces réseaux sont caractérisés par la petite taille de leur cellules.

Cependant, l'étude de ces réseaux avec la prise en considération des appels répétés par le modèle conventionnel des files d'attente avec rappel (*FAR*) pourrait être assez compliquée. D'autre part, les réseaux de Petri stochastiques généralisés (*RDPSG*) constituent une alternative très puissante pour la représentation graphique et l'analyse qualitative et quantitative des performances des systèmes avec rappel hétérogènes, et semble plus flexible comparé aux *FAR*.

Ainsi, nous nous intéressons dans ce chapitre, à l'étude des performances des stratégies de *CAC* avec rappel dans les réseaux *SCNs*. Dans cette optique, notre travail présente deux contributions : Nous proposons dans une première partie, la modélisation et l'analyse d'un modèle de *CAC* avec rappel, source finie et  $g$  canaux gardiens, à l'aide du formalisme des chaînes de Markov à temps continu. Nous proposons dans ce cadre une généralisation de l'algorithme de *Tran-Gia* et *Mandjes* [1] à un nombre quelconque de canaux gardiens ( $g \geq 1$ ) tout en

considérant une source d'abonnés finie, et ce pour calculer les différentes probabilités d'états. Nous proposons ensuite la modélisation et l'analyse du même mécanisme par les RDPSG. Dans une seconde partie, nous définissons une nouvelle stratégie de CAC basée sur la technique des canaux gardiens et une priorité pour les appels répétés bloqués initiés dans la micro-cellule, à l'aide des RDPSG. Cette priorité est assurée grâce à un nouveau concept dit d'*emprunt de canaux gardiens*. Ce dernier, repose sur une légère modification de la sémantique des canaux gardiens classiques de manière à ce qu'une partie d'entre eux puisse être empruntée et allouée temporairement aux rappels des nouveaux appels bloqués. Cette priorité permet d'améliorer la probabilité de blocage globale des nouveaux appels et d'augmenter l'utilisation des canaux.

## 4.2 Évaluation des performances d'une stratégie de CAC avec rappel des nouveaux appels, source finie et $g$ canaux gardiens

Dans cette section nous nous intéressons à l'analyse d'une stratégie de CAC avec rappel des nouveaux appels bloqués et réservation de  $g$  canaux gardiens dans les réseaux SCNs. Nous utilisons dans un premier temps, les chaînes de Markov à temps continu CMTC, puis nous passons aux réseaux de Petri stochastiques généralisés RDPSG.

Les réseaux SCNs sont caractérisés par : la petite taille de leurs cellules (micro, pico, femto-cellule, dans la taille varie entre 10 et 200 m), des handovers fréquents et un nombre d'abonnés dans la micro-cellule relativement grand. Aussi grand que soit le nombre d'abonnés qui peuvent exister dans la zone de couverture d'une micro-cellule, il reste fini et dénombrable. Pour cela, dans tous les modèles de CAC avec rappel étudiés dans ce mémoire, nous considérons une population d'abonnés *finie*. Dans la littérature, il existe quelques travaux de l'étude des performances des réseaux mobiles cellulaires qui ont considéré une source d'abonnés *finie* tels que : [1], [94], [98], [103] et [104]. Ces travaux ont démontré que les petites tailles de la population améliorent les performances du réseau.

### 4.2.1 Description mathématique

Dans notre étude, nous supposons que toutes les micro-cellules d'un réseau SCN sont identiques et ont les mêmes paramètres du trafic. Donc, pour l'étude des performances, nous pouvons nous concentrer sur l'étude d'une micro-cellule particulière et représenter toutes les interactions avec les micro-cellules adjacentes par un processus d'arrivée des appels de handovers. De ce fait, nous considérons un système élémentaire constitué d'une seule micro-cellule à source finie d'abonnés de taille  $L$  ( $L < +\infty$ ) et dont la station de base est composée de  $C$  ( $C \geq 2$ ) canaux fiables.

Les appels arrivent dans le réseau selon un processus quasi-aléatoire suivant deux flux indépendant l'un de l'autre : les arrivées des nouveaux appels (appels générés à l'intérieur de la zone de couverture de la micro-cellule servante) avec un taux d'arrivée moyen égal à  $\lambda_F$  et les arrivées des appels de handovers en transit (appels en transfert intercellulaire vers la SB servante) avec un taux d'arrivée moyen égal à  $\lambda_H$ . Le taux d'arrivée total des appels est égal à  $\lambda = \lambda_F + \lambda_H$ . La durée d'un appel suit une loi exponentielle de taux  $\mu$ .

Vue que la terminaison forcée d'un appel en cours est plus gênante pour un abonné que le blocage au début d'un nouvel appel. Donc, la probabilité de blocage des appels de handovers

4.2. Évaluation des performances d'une stratégie de CAC avec rappel des nouveaux appels, source finie et  $g$  canaux gardiens

est plus critique que celle de blocage des nouveaux appels. Pour cette raison, la priorité est donnée aux appels de handovers en réservant un nombre  $g$  ( $g < C$ ) de l'ensemble des canaux  $C$  d'une micro-cellule exclusivement pour les requêtes handovers. Ces canaux sont appelés *canaux de garde (canaux gardiens)*. Tandis que les autres  $n = C - g$  canaux (appelés *canaux ordinaires* ou *partagés*) sont partagés entre les nouveaux appels et les appels de handovers, voir la figure 4.1.

Dans cette politique de CAC :

- Une arrivée d'un nouvel appel qui trouve au moins  $g + 1$  canaux libres (au plus  $C-g-1$  canaux occupés) sera immédiatement servie. Dans le cas où il y a au plus  $g$  canaux libres (au moins  $C-g$  canaux occupés), l'appel sera bloqué et va rejoindre un espace imaginaire de taille finie (L-C) appelé *orbite* pour tenter de rappeler le service après un temps aléatoire fini avec une probabilité égale à  $\theta$ . Les temps d'inter-arrivées des tentatives de rappels sont supposés être indépendants les uns des autres et suivent un processus quasi-aléatoire de taux  $\alpha$ . La requête de rappel d'un nouvel appel bloqué est traitée de la même manière qu'une nouvelle requête d'un nouvel appel. Un abonné en attente dans l'orbite peut devenir *impatient* et décide de quitter le système définitivement après un temps fini avec une probabilité égale à  $1 - \theta$ . Notons que  $\theta$  est utilisée pour représenter le degré de persévérance d'un abonné. Nous supposons qu'un abonné rappelle le service au moins une fois.
- Une arrivée d'un appel de handover qui trouve au moins un canal libre (au plus  $C-1$  canaux occupés), sera immédiatement servie. Dans le cas contraire, le cas où il n'y a aucun canal libre (tous les C canaux sont occupés), l'appel sera bloqué et perdu pour toujours. Par conséquent, cette politique ne considère que le rappel des nouveaux appels et non des appels de handovers.

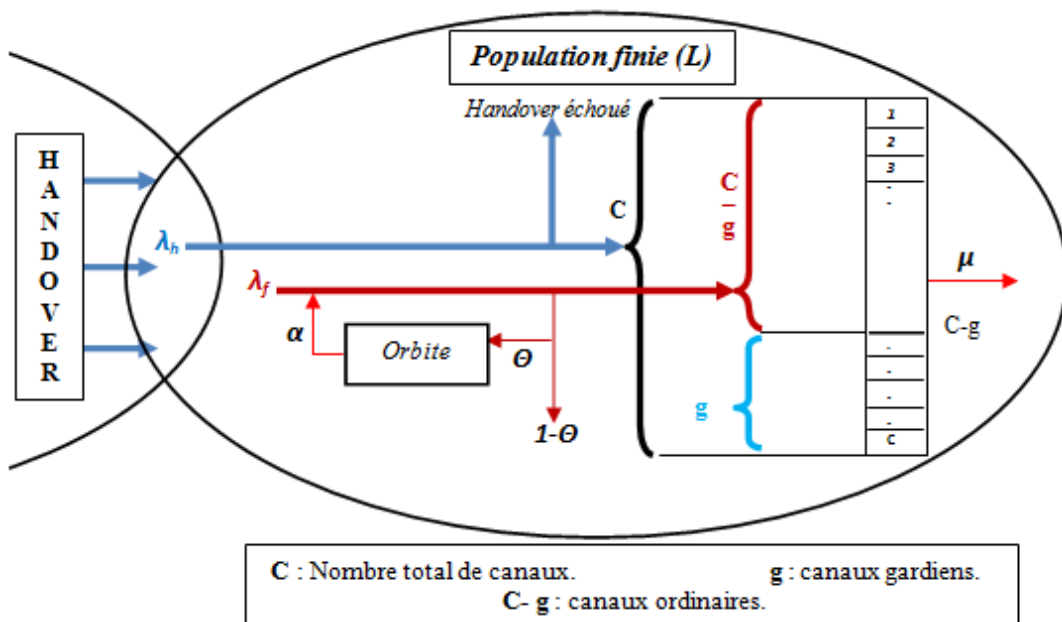


FIGURE 4.1 – Modèle de CAC avec rappel des nouveaux appels bloqués, source finie et réservation de  $g$  canaux gardiens.

## 4.2.2 Analyse du modèle

### 4.2.2.1 Formulation du modèle en une CMTC

Une chaîne de Markov à temps continu *CMTC* est utilisée pour modéliser le mécanisme de *CAC* (voir la figure 4.2). Le fonctionnement de la micro-cellule est décrit à l'aide du processus  $x = \{Y, Z\}$ , où  $Y$  représente le nombre de canaux occupés, et  $Z$  représente le nombre d'appels en attente dans l'orbite à l'instant  $t$ , avec :  $x(i,j) = Pr \{Y=i, Z=j\}$ .

Le nombre des stations mobiles dans une micro-cellule est considéré *fini* de taille égale à  $L$ . Par conséquent, l'espace d'états est fini et défini par :  $\{0, 1, \dots, c\} \times \{0, 1, \dots, L - (c - g)\}$ . Tel que :  $c$  représente le nombre total de canaux de la station de base.

### 4.2.2.2 Algorithme d'analyse

Pour le calcul des probabilités d'états, nous nous basons sur le principe de l'algorithme semi-récuratif de *Tran-Gia* et *Mandjes* [1]. Comme cet algorithme est conçu pour les modèles de *CAC* avec un seul canal gardien et une source infinie, nous proposons une généralisation de cet algorithme à un **nombre quelconque de canaux gardiens** pour le cas d'une **source finie** (le cas des réseaux *SCNs*).

Le but de cet algorithme en premier lieu, est d'exprimer toutes les probabilités d'états  $x(i,j)$  en fonction des coefficients  $K_0, K_1, \dots, K_g$ , en utilisant les différentes équations de flux d'entrée-sortie  $E(i,j)$  tel que :  $i \in \{0, \dots, c\}$ ,  $j \in \{0, \dots, L - (c - g)\}$ . Autrement dit, chercher tous les coefficients  $\mu_0(i,j), \dots, \mu_g(i,j)$  tel que :

$$x(i,j) = K_0\mu_0(i,j) + K_1\mu_1(i,j) + \dots + K_g\mu_g(i,j).$$

Après, et dans le but d'exprimer toutes les probabilités en fonction de  $K_0$  seulement, l'algorithme procède à l'élimination de tous les coefficients  $K_k$ ,  $k = 1, \dots, g$ , en utilisant les différentes relations entre les ratios  $k_k/k_0$  ( $k = 1, \dots, g$ ), obtenus à partir des équations d'états de la dernière colonne de la *CMTC*. Résultat, les probabilités d'états  $x(i,j) = \sum_{k=0}^g k_k \mu_k(i,j)$  deviennent :

$$x(i,j) = k_0(\mu_0(i,j) + \sum_{k=1}^g \left(\frac{k_k}{k_0}\right) \cdot \mu_k(i,j)).$$

Ainsi,  $k_0$  est le seul inconnu. Par la suite, l'équation de la normalisation est utilisée pour calculer la valeur de  $k_0$ . En fin, le calcul final des probabilités d'états est effectué d'une manière récursive, en substituant la valeur de  $k_0$  dans toutes les équations.

L'algorithme proposé se déroule en quatre étapes principales. Ces étapes sont décrites en détail dans ce qui suit :

4.2. Évaluation des performances d'une stratégie de CAC avec rappel des nouveaux appels, source finie et  $g$  canaux gardiens

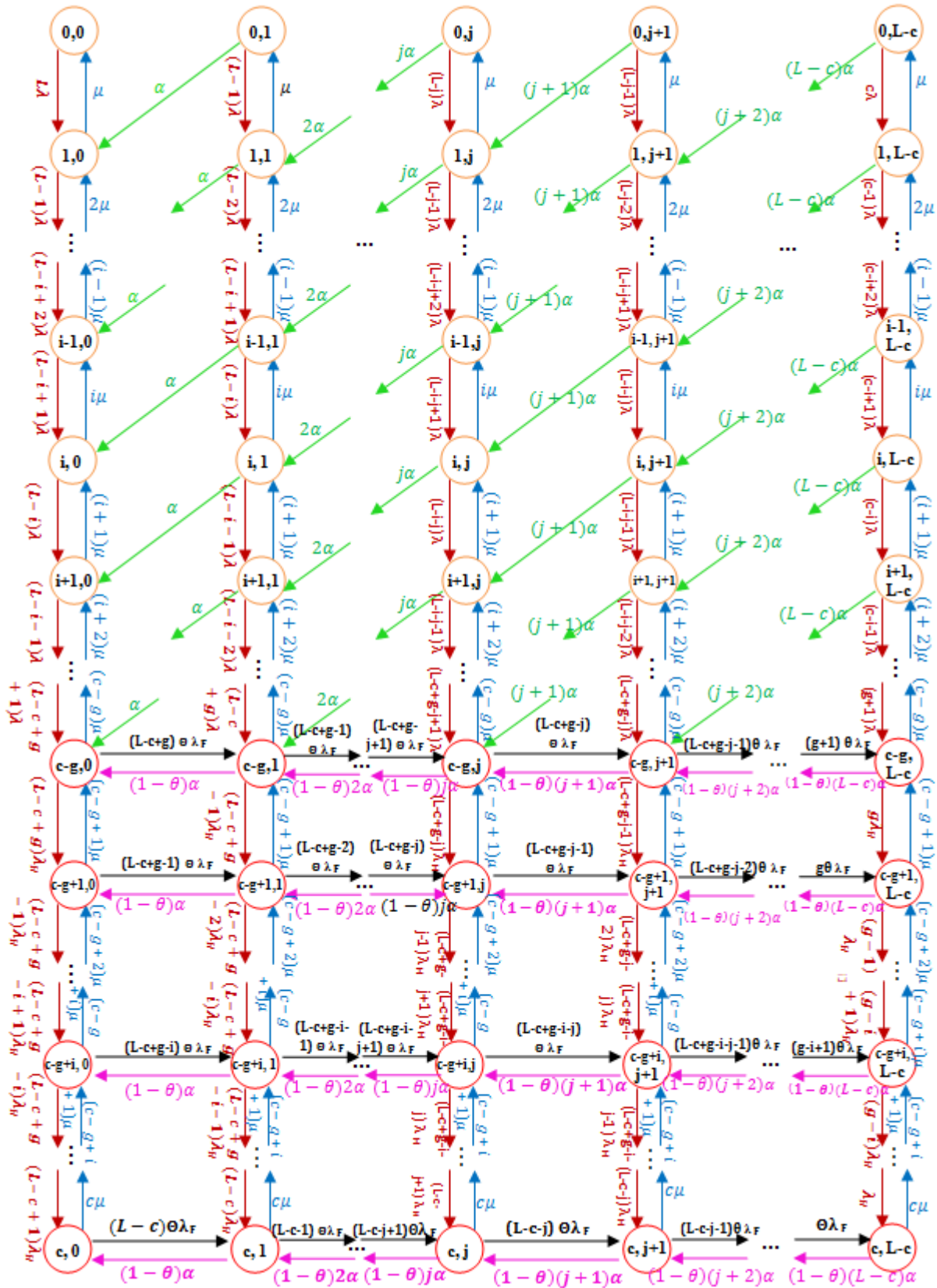


FIGURE 4.2 – Diagramme d'état de transition de la stratégie de CAC avec rappel, source finie et  $g$  canaux gardiens.

**Algorithm 2:** L'algorithme de calcul des probabilités d'états.

---

### 1) Première étape : Calcul des colonnes $(L-c)$ jusqu'à $((L-c)-g)$

a) Calcul des  $x(i,j)$ ,  $i=0,1,\dots,c-(g+1)$ ,  $j=L-c$  :

On pose  $x(0,L-c)=K_0$ , tel que  $\mu_0(0,L-c)=1$ ,  $\mu_1(0,L-c)=0, \dots, \mu_g(0,L-c)=0$ .

On calcule les  $x(i,L-c)$  en utilisant les équations de flux d'entrée-sortie :

$$E(i,L-c), i=0,1,\dots,c-(g+1).$$

On obtient alors les équations généralisées suivantes :

$$x(1,L-c) = \frac{((L-c)\alpha + c(\lambda_F + \lambda_H))}{\mu} x(0,L-c),$$

Et

**Pour**  $i=1$  à  $c-(g+1)$

$$\begin{aligned} x(i+1,L-c) &= x(i,L-c) \frac{((c-i)(\lambda_F + \lambda_H) + (L-c)\alpha + i\mu)}{(i+1)\mu} \\ &\quad - x(i-1,L-c) \frac{(c-i+1)(\lambda_F + \lambda_H)}{(i+1)\mu}. \end{aligned}$$

**Fin pour**

b) Calcul des  $x(i,f)$ ,  $i=0, 1, \dots, c-(g+1)$  et  $f=(L-c)-1, \dots, (L-c)-g$  :

**Pour**  $j = 1$  à  $g$

On pose  $x(0,(L-c)-j)=K_j$ , tel que  $\mu_j(0,(L-c)-j)=1$ ,  $\mu_{e \neq j}(0,(L-c)-j)=0$ ,  $e \in \{0, \dots, g\}$ .

On calcule les  $x(i,(L-c)-j)$  en utilisant les équations de flux d'entrée-sortie :

$$E(i,(L-c)-j), i=0,1,\dots,c-(g+1).$$

On obtient alors les équations généralisées suivantes :

$$x(1,(L-c)-j) = x(0,(L-c)-j) \frac{((c+j)(\lambda_F + \lambda_H) + ((L-c)-j)\alpha)}{\mu}.$$

Et

**Pour**  $i = 1$  à  $c-(g+1)$

$$\begin{aligned} x(i+1,(L-c)-j) &= x(i,(L-c)-j) \frac{((c-i+j)(\lambda_F + \lambda_H) + ((L-c)-j)\alpha + i\mu)}{(i+1)\mu} \\ &\quad - x(i-1,((L-c)-j)+1) \frac{(((L-c)-j)+1)\alpha}{(i+1)\mu} \\ &\quad - x(i-1,(L-c)-j) \frac{(c-i+j+1)(\lambda_F + \lambda_H)}{(i+1)\mu}. \end{aligned}$$

**Fin pour**

**Fin pour**

c) Calcul des  $x(i, j)$  tel que  $i = c-(g-1), \dots, c$  et  $j = (L-c), \dots, (L-c)-g$  :

i. Calcul des  $x(c-g+1, j)$  en utilisant  $E(c-g, j)$ ,  $j = (L-c), \dots, j = ((L-c)-g) + 1$

**Pour**  $j = (L-c) - 1$  à  $((L-c)-g) + 1$

$$\begin{aligned} x(c-g+1, j)(c-g+1)\mu &= x(c-g, j)((L-c+g-j)\theta\lambda_F \\ &\quad + (L-c+g-j)\lambda_H + j(1-\theta)\alpha + (c-g)\mu) \\ &\quad - x(c-g-1, j)(L-c+g-j+1)(\lambda_F + \lambda_H) \\ &\quad - x(c-g-1, j+1)(j+1)\alpha \\ &\quad - x(c-g, j+1)(j+1)(1-\theta)\alpha \\ &\quad - x(c-g, j-1)(L-c+g-j+1)\theta\lambda_F. \end{aligned}$$

**Fin pour**

Pour calculer  $x(c-g+1, L-c)$ , on utilise l'équation  $E(c-g, L-c)$  :

$$\begin{aligned} x(c-g+1, L-c)(c-g+1)\mu &= x(c-g, L-c)((L-c)(1-\theta)\alpha + g\lambda_H \\ &\quad + (c-g)\mu) \\ &\quad - x(c-g-1, L-c)(g+1)(\lambda_F + \lambda_H) \\ &\quad - x(c-g, L-c-1)(g+1)\theta\lambda_F. \end{aligned}$$

ii. Calcul des  $x(i, j)$  tel que :  $i = c-(g-2), \dots, c$  et  $j = (L-c), \dots, (L-c)-g$

ii.1. Calcul des  $x(i, j)$  en utilisant  $E(i-1, j)$  tel que :  $i = c-(g-1), \dots, c$ ,  $j = L-c, \dots, P$  et  $P = ((L-c)-g) + 2, \dots, (L-c)-1$  :

$P = ((L-c)-g) + 2$  ;

**Pour**  $i = c-(g-1)$  à  $c-1$

$i++$  ;

**Pour**  $j = (L-c)-1$  à  $P$

$$\begin{aligned} x(i, j)i\mu &= x(i-1, j)(j(1-\theta)\alpha + (L-i-j+1)\lambda_H \\ &\quad + (i-1)\mu + (L-i-j+1)\theta\lambda_F) \\ &\quad - x(i-2, j)(L-i-j+2)\lambda_H \\ &\quad - x(i-1, j+1)(j+1)(1-\theta)\alpha \\ &\quad - x(i-1, j-1)(L-i-j+2)\theta\lambda_F. \end{aligned}$$

**Fin pour**

$i--$  ; /\* Calcul de  $x(i, L-c)$  \*/

$$\begin{aligned} x(i+1, L-c)(i+1)\mu &= x(i, L-c)((c-i)\lambda_H + i\mu \\ &\quad + (L-c)(1-\theta)\alpha) \\ &\quad - x(i-1, L-c)(c-i+1)\lambda_H \\ &\quad - x(i, L-c-1)(c-i+1)\theta\lambda_F. \end{aligned}$$

$P++$  ;

**Fin pour**

**ii.2.** Calcul de  $x(c, (L-c)-1)$  en utilisant  $E(c, L-c)$  :

$$x(c, (L-c)-1)\theta\lambda_F = x(c, L-c)((L-c)(1-\theta)\alpha + c\mu) - x(c-1, L-c)\lambda_H.$$

**ii.3.** Calcul des  $x(i, j)$  en utilisant  $E(i, j+1)$  :  $i = c-j+1, \dots, c-g+1$  ;  $j=2, \dots, g$  :

**Pour**  $j=2$  à  $g$

$$\begin{aligned} x(c, L-c-j)j\theta\lambda_F &= x(c, L-c-j+1)((L-c-j+1)(1-\theta)\alpha \\ &\quad + (j-1)\theta\lambda_F + c\mu) \\ &\quad - x(c-1, L-c-j+1)j\lambda_H \\ &\quad - x(c, L-c-j+2)(L-c-j+2)(1-\theta)\alpha. \end{aligned}$$

**Pour**  $i = c-1$  à  $c-(j-1)$

$$\begin{aligned} x(i, L-c-j)(c-i+j)\theta\lambda_F &= x(i, L-c-j+1)((L-c-j+1)(1-\theta)\alpha \\ &\quad + (c-i+j-1)\lambda_H + i\mu + (c-i+j-1)\theta\lambda_F) \\ &\quad - x(i-1, L-c-j+1)(c-i+j)\lambda_H \\ &\quad - x(i, L-c-j+2)(L-c-j+2)(1-\theta)\alpha \\ &\quad - x(i+1, L-c-j+1)(i+1)\mu. \end{aligned}$$

**Fin pour**

**Fin pour**

## 2) Deuxième étape : Calcul des colonnes $((L-c)-g)-1$ jusqu'à 1

Dans cette section nous montrons comment calculer la colonne  $j$  à partir de la colonne  $j+1$  en invoquant les équations  $E(0, j)$  jusqu'à  $E(c-g-1, j)$  et  $E(c-g, j+1)$  jusqu'à  $E(c, j+1)$ . Ainsi, en exploitant cette procédure  $((L-c)-g)-1$  fois, nous pouvons exprimer toutes les probabilités comme une combinaison linéaire des  $k_k$ ,  $k=0, \dots, g$ .

Maintenant nous nous focalisons sur la colonne  $j$  :

Dans un premier temps, les probabilités seront exprimées en fonction des coefficients  $v_0(i, j), v_1(i, j), \dots, v_g(i, j), \gamma(i, j)$  comme suit :

$$x(i, j) = v_0(i, j)k_0 + v_1(i, j)k_1 + \dots + v_g(i, j)k_g + \gamma(i, j)M.$$

**Pour**  $j = ((L-c)-g)-1$  à 1

a) On pose  $x(0, j)=M$ , tel que  $v_e(0, j) = 0$ ,  $e \in \{0, 1, \dots, g\}$ ,  $\gamma(0, j) = 1$ .

b) On calcule les  $x(i, j)$  en utilisant les équations de flux d'entrée-sortie :

$$E(i, j), i = 0, 1, \dots, c-g-1.$$

Qui donnent les équations généralisées suivantes :

$$x(1, j) = x(0, j) \frac{((L-j)(\lambda_F + \lambda_H) + j\alpha)}{\mu}.$$

Et

**Pour**  $i=1$  à  $c-(g+1)$

$$\begin{aligned} x(i+1, j) = & x(i, j) \frac{((L-i-j)(\lambda_F + \lambda_H) + j\alpha + i\mu)}{(i+1)\mu} \\ & - x(i-1, j+1) \frac{(j+1)\alpha}{(i+1)\mu} \\ & - x(i-1, j) \frac{(L-i-j+1)(\lambda_F + \lambda_H)}{(i+1)\mu}. \end{aligned}$$

**Fin pour**

Pour  $i = c-(g+1)$  on obtient l'équation :

$$x(c-g, j) = v_0(c-g, j)K_0 + v_1(c-g, j)K_1 + \dots + v_g(c-g, j)K_g + \gamma(c-g, j)M \dots(a)$$

c) On calcule pour la deuxième fois  $x(c-g, j)$ , en utilisant  $E(c-g, j+1)$  comme suit :

$$\begin{aligned} x(c-g, j)(L-c+g-j)\theta\lambda_F = & x(c-g, j+1)((j+1)(1-\theta)\alpha + (c-g)\mu \\ & + (L-c+g-j-1)\theta\lambda_F + (L-c+g-j-1)\lambda_H) \\ & - x(c-g-1, j+1)(L-c+g-j)(\lambda_F + \lambda_H) \\ & - x(c-g-1, j+2)(j+2)\alpha \\ & - x(c-g, j+2)(j+2)(1-\theta)\alpha \\ & - x(c-g+1, j+1)(c-g+1)\mu \dots(b) \end{aligned}$$

Avec (b) on obtient :

$$x(c-g, j) = K_0\mu_0(c-g, j) + K_1\mu_1(c-g, j) + \dots + K_g\mu_g(c-g, j) \dots(c)$$

d) En mettant (a) = (c) on calcule  $M$  comme suit :

$$M = \frac{(K_0(\mu_0(c-g, j) - v_0(c-g, j)) + K_1(\mu_1(c-g, j) - v_1(c-g, j)) + \dots + K_g(\mu_g(c-g, j) - v_g(c-g, j)))}{\gamma(c-g, j)} \dots(d)$$

Ainsi, on recalcule les  $x(i, j)$  cette fois avec  $\mu_0, \dots, \mu_g$ , en utilisant (d) :

**Pour**  $i = 0, \dots, c-(g+1)$  et  $k = 0, 1, \dots, g$

$$\mu_k(i, j) = v_k(i, j) + \frac{\mu_k(c-g, j) - v_k(c-g, j)}{\gamma(c-g, j)} \gamma(i, j).$$

- e) Calcul de  $x(i,j)$  tel que :  $i = c-(g-1), \dots, c-1$  et  $j = ((L-c)-(g+1)), \dots, 1$   
**Pour**  $i = c-(g-1)$  à  $c-1$

$$\begin{aligned} x(i,j)(L-i-j)\theta\lambda_F &= x(i,j+1)(i\mu + (L-i-j-1)\theta\lambda_F \\ &\quad + (L-i-j-1)\lambda_H + (j+1)(1-\theta)\alpha) \\ &\quad - x(i-1,j+1)(L-i-j)\lambda_H \\ &\quad - x(i,j+2)(j+2)(1-\theta)\alpha \\ &\quad - x(i+1,j+1)(i+1)\mu. \end{aligned}$$

**Fin pour**

- f) Calcul de  $x(c,j)$  en utilisant  $E(c,j+1)$  :

$$\begin{aligned} x(c,j)(L-c-j)\theta\lambda_F &= x(c,j+1)(c\mu + (L-c-j-1)\theta\lambda_F + (j+1)(1-\theta)\alpha) \\ &\quad - x(c-1,j+1)(L-c-j)\lambda_H \\ &\quad - x(c,j+2)(j+2)(1-\theta)\alpha. \end{aligned}$$

**Fin pour**

### 3) Troisième étape : Élimination des constants $k_1, \dots, K_g$

Dans cette étape, nous allons exprimer toutes les probabilités en fonction de  $K_0$  seulement, pour cela :

- a) En utilisant les équations  $E(\theta,0)$  jusqu'à  $E(c-g-1,0)$  nous pouvons exprimer toutes les probabilités d'états  $x(i,j)$  comme suit :

$$x(i,j) = \sum_{k=0}^g k_k \mu_k(i,j).$$

- i. Calcul de  $x(c-g, 0)$  :

$$\begin{aligned} x(c-g,0)(L-c+g)\theta\lambda_F &= x(c-g,1)((c-g)\mu + (1-\theta)\alpha + (L-c+g-1)\lambda_H \\ &\quad + (L-c+g-1)\theta\lambda_F) \\ &\quad - x(c-g-1,1)(L-c+g)(\lambda_F + \lambda_H) \\ &\quad - x(c-g+1,1)(c-g+1)\mu \\ &\quad - x(c-g,2)(1-\theta)2\alpha \\ &\quad - x(c-g-1,2)2\alpha \dots(e) \end{aligned}$$

- ii. Calcul de  $x(c-g-1, 0)$  :

$$\begin{aligned} x(c-g-1,0)(L-c+g+1)(\lambda_F + \lambda_H) &= x(c-g,0)((L-c+g)\lambda_H \\ &\quad + (c-g)\mu + (L-c+g)\theta\lambda_F) \\ &\quad - x(c-g,1)(1-\theta)\alpha \\ &\quad - x(c-g+1,0)(c-g+1)\mu \\ &\quad - x(c-g-1,1)\alpha \dots(f) \end{aligned}$$

- iii. Calcul de  $x(i, 0) : i = c-(g+1), \dots, 1$  :  
**Pour**  $i = c-(g+1)$  à  $1$

$$\begin{aligned} x(i-1, 0)(L-i+1)(\lambda_F + \lambda_H) &= x(i, 0)((L-i)(\lambda_F + \lambda_H) + i\mu) \\ &\quad - x(i-1, 1)\alpha \\ &\quad - x(i+1, 0)(i+1)\mu \dots (g) \end{aligned}$$

**Fin pour**

- iv. Calcul  $x(0, 0)$  :

$$x(0, 0)L(\lambda_F + \lambda_H) = x(1, 0)((L-1)(\lambda_F + \lambda_H) + \mu) - x(0, 1)\alpha - x(2, 0)2\mu$$

Depuis (e), (f) et (g) on peut écrire :

$$x(i, j) = \sum_{k=0}^g K_k \mu_k(i, j) \dots (h)$$

- b) En invoquant  $E(c-g+1, 0)$  jusqu'à  $E(c, 0)$ , on peut trouver tous les ratios  $K_k/K_0$ ,  $k = 1, \dots, g$ . Par conséquent,  $x(i, j)$  peut être exprimé comme :

$$x(i, j) = k_0 U(i, j). \text{ Avec, } U(i, j) = \mu_0(i, j) + \sum_{k=1}^g \frac{K_k}{K_0} \mu_k(i, j).$$

Pour cela, on a :

**Pour**  $i = c-(g-1)$  à  $c$

- i. Calcul de  $x(c-g+1, 0)$

$$\begin{aligned} x(c-g+1, 0)(c-g+1)\mu &= \\ &\quad x(c-g, 0)((c-g)\mu + (L-c+g)\lambda_H + (L-c+g)\theta\lambda_F) \\ &\quad - x(c-g-1, 0)(L-c+g+1)(\lambda_F + \lambda_H) \\ &\quad - x(c-g-1, 1)\alpha \\ &\quad - x(c-g, 1)(1-\theta)\alpha. \end{aligned}$$

- ii. Calcul des  $x(i, 0)$ ,  $i = c-(g-1), \dots, c$  :  
**Pour**  $i = c-(g-1)$  à  $c-1$

$$\begin{aligned} x(i+1, 0)(i+1)\mu &= x(i, 0)(i\mu + (L-i)\lambda_H + (L-i)\theta\lambda_F) \\ &\quad - x(i-1, 0)(L-i+1)\lambda_H \\ &\quad - x(i, 1)(1-\theta)\alpha \dots (i) \end{aligned}$$

**Fin pour**

iii. Calcul de  $x(c, \theta)$  :

$$\begin{aligned} x(c, 0)c\mu &= x(c-1, 0)((c-1)\mu + (L-c+1)\lambda_H + (L-c+1)\theta\lambda_F) \\ &\quad - x(c-2, 0)(L-c+2)\lambda_H \\ &\quad - x(c-1, 1)(1-\theta)\alpha. \end{aligned}$$

Dans un premier temps on a (h) et d'autre part on a (i), depuis (h) et (i) on trouve :

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^g K_k \mu_k(i+1, 0)(i+1)\mu &= \sum_{k=0}^g K_k \mu_k(i, 0)(i\mu + (L-i)\lambda_H + (L-i)\theta\lambda_F) \\ &\quad - \sum_{k=0}^g K_k \mu_k(i-1, 0)(L-i+1)\lambda_H \\ &\quad - \sum_{k=0}^g K_k \mu_k(i, 1)(1-\theta)\alpha. \end{aligned}$$

$$\sum_{k=1}^g \frac{K_k}{K_0} = \frac{\left( (\mu_0(i+1, 0)(i+1)\mu) - (\mu_0(i, 0)(i\mu + (L-i)\lambda_H + (L-i)\theta\lambda_F)) + (\mu_0(i-1, 0)(L-i+1)\lambda_H) + (\mu_0(i, 1)(1-\theta)\alpha) \right)}{\sum_{k=1}^g \left( (\mu_k(i, 0)(i\mu + (L-i)\lambda_H + (L-i)\theta\lambda_F)) - (\mu_k(i-1, 0)(L-i+1)\lambda_H) - (\mu_k(i, 1)(1-\theta)\alpha) - (\mu_k(i+1, 0)(i+1)\mu) \right)}$$

Ainsi, les probabilités d'états  $x(i, j) = \sum_{k=0}^g K_k \mu_k(i, j)$  deviennent :

$$x(i, j) = k_0(\mu_0(i, j) + \sum_{k=1}^g \frac{K_k}{K_0} \cdot \mu_k(i, j)).$$

Dans ce cas  $k_0$  est le seul inconnu.

4) Enfin, nous utilisons l'équation de normalisation pour calculer  $K_0$  :

$$\sum_{i=0}^c \sum_{j=0}^{L-c} x(i, j) = 1.$$

### 4.2.3 Indices de performance [1], [50]

Après avoir calculé les probabilités du système à l'état stationnaire, les indices de performances les plus importants peuvent être exprimés en fonction des différents taux du trafic illustrés dans la figure 4.3 comme suit :

– Le nombre moyen de canaux occupés ( $n_o$ )

Il correspond au nombre moyen des appels en cours de communication.

$$n_o = \sum_{i=0}^c \sum_{j=0}^{L-c} i \cdot \pi_{i,j}$$

– Le nombre moyen de canaux libres ( $n_L$ )

Il correspond au nombre moyen des canaux non occupés.

$$n_L = c - n_o = c - \sum_{i=0}^c \sum_{j=0}^{L-c} i \cdot \pi_{i,j}$$

4.2. Évaluation des performances d'une stratégie de CAC avec rappel des nouveaux appels, source finie et  $g$  canaux gardiens

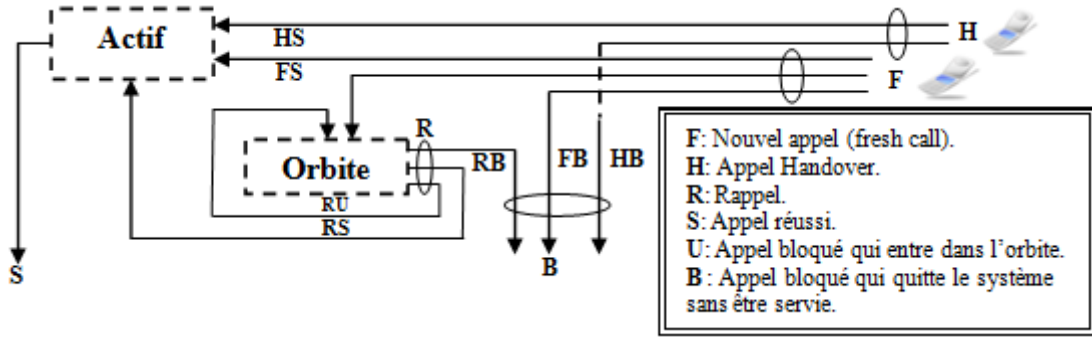


FIGURE 4.3 – Le flux du trafic global offert dans la micro-cellule.

- Le nombre moyen de nouveaux appels en attente dans l'orbite ( $n_n$ )  
Il correspond au nombre moyen des appels en attente dans l'orbite.

$$n_n = \sum_{i=0}^c \sum_{j=0}^{L-c} j \cdot \pi_{i,j}$$

- Le nombre moyen d'abonnés dans la micro-cellule ( $n$ )  
Il correspond au nombre moyen d'abonnés en cours de communication plus le nombre moyen d'abonnés en attente dans l'orbite.

$$n = n_o + n_n = \sum_{i=0}^c \sum_{j=0}^{L-c} (i + j) \cdot \pi_{i,j}$$

- Le taux moyen de nouveaux appels servis dès la première tentative ( $\bar{\lambda}_{FS}$ )

$$\bar{\lambda}_{FS} = \lambda_F \cdot \sum_{i=0}^{c-g-1} \sum_{j=0}^{L-c} (L - i - j) \cdot \pi_{i,j}$$

- Le taux moyen de nouveaux appels bloqués qui rejoignent l'orbite ( $\bar{\lambda}_{FU}$ )

$$\bar{\lambda}_{FU} = \lambda_F \cdot \theta \cdot \sum_{i=c-g}^c \sum_{j=0}^{L-c} (L - i - j) \cdot \pi_{i,j}$$

- Le taux moyen de nouveaux appels bloqués qui quittent le système sans être servis ( $\bar{\lambda}_{FB}$ )

$$\bar{\lambda}_{FB} = \lambda_F \cdot (1 - \theta) \cdot \sum_{i=c-g}^c \sum_{j=0}^{L-c} (L - i - j) \cdot \pi_{i,j}$$

- Le taux moyen total d'arrivée de nouveaux appels ( $\bar{\lambda}_F$ )

$$\bar{\lambda}_F = \bar{\lambda}_{FS} + \bar{\lambda}_{FU} + \bar{\lambda}_{FB}$$

- Le taux moyen de rappels servis dès la première tentative ( $\bar{\alpha}_{RS}$ )

$$\bar{\alpha}_{RS} = \alpha \cdot \sum_{i=0}^{c-g-1} \sum_{j=1}^{L-c} j \cdot \pi_{i,j}$$

- Le taux moyen de rappels bloqués ( $\bar{\alpha}_{RU}$ )

$$\bar{\alpha}_{RU} = \alpha \cdot \theta \cdot \sum_{i=c-g}^c \sum_{j=1}^{L-c} j \cdot \pi_{i,j}$$

4.2. Évaluation des performances d'une stratégie de CAC avec rappel des nouveaux appels, source finie et  $g$  canaux gardiens

---

- Le taux moyen de rappels qui quittent le système sans être servis ( $\bar{\alpha}_{RB}$ )

$$\bar{\alpha}_{RB} = \alpha \cdot (1 - \theta) \cdot \sum_{i=c-g}^c \sum_{j=1}^{L-c} j \cdot \pi_{i,j}$$

- Le taux moyen total d'arrivée de rappels ( $\bar{\alpha}$ )

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_{RS} + \bar{\alpha}_{RU} + \bar{\alpha}_{RB}$$

- Le taux moyen d'appels de handovers servis dès la première tentative ( $\bar{\lambda}_{HS}$ )

$$\bar{\lambda}_{HS} = \lambda_H \cdot \sum_{i=0}^{c-1} \sum_{j=0}^{L-c} (L - i - j) \cdot \pi_{i,j}$$

- Le taux moyen d'appels de handovers qui quittent le système sans être servis ( $\bar{\lambda}_{HB}$ )

$$\bar{\lambda}_{HB} = \lambda_H \cdot \sum_{j=0}^{L-c} (L - c - j) \cdot \pi_{c,j}$$

- Le taux moyen total d'arrivée des appels de handovers ( $\bar{\lambda}_H$ )

$$\bar{\lambda}_H = \bar{\lambda}_{HS} + \bar{\lambda}_{HB}$$

- Le taux moyen d'une communication ( $\bar{\mu}$ )

$$\bar{\mu} = \mu \cdot \sum_{i=1}^c \sum_{j=0}^{L-c} i \cdot \pi_{i,j} = \mu \cdot n_o$$

- La probabilité de blocage des nouveaux appels ( $P_{BF}$ )

$$P_{BF} = \frac{\bar{\lambda}_{FU} + \bar{\lambda}_{FB}}{\bar{\lambda}_F}$$

- La probabilité de blocage de rappel ( $P_{BR}$ )

$$P_{BR} = \frac{\bar{\alpha}_{RU} + \bar{\alpha}_{RB}}{\bar{\alpha}}$$

- La probabilité de blocage globale d'un nouvel appel ( $P_N$ )

$$P_N = \frac{\bar{\lambda}_F}{\bar{\lambda}_F + \bar{\alpha}} \cdot P_{BF} + \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\lambda}_F + \bar{\alpha}} \cdot P_{BR}$$

- La probabilité de blocage des appels de handovers ( $P_{BH}$ )

$$P_{BH} = \frac{\bar{\lambda}_{HB}}{\bar{\lambda}_H}$$

- Le nombre moyen de tentatives par appel ( $\eta$ )

$$\eta = \frac{\bar{\alpha} + \bar{\lambda}_F}{\bar{\lambda}_F} = 1 + \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\lambda}_F}$$

- La disponibilité de  $s$  canaux ( $A_S$ )

Ceci correspond à la probabilité que  $s$  ( $1 \leq s \leq c$ ) canaux sont oisifs.

$$A_S = \sum_{i=0}^{c-s} \sum_{j=0}^{L-i} \pi_{i,j}$$

- Le temps d'attente moyen d'un nouvel appel ( $\bar{W}_F$ )

Le temps d'attente (virtuel) d'un abonné correspond à la durée du temps entre l'arrivée d'un appel et son début de service. Le temps d'attente moyen  $\bar{W}_F$  à l'état stationnaire, peut être facilement obtenu à l'aide de la formule de *Little*.

$$\bar{W}_F = \frac{n_n}{\bar{\lambda}_F}$$

#### 4.2.4 Le formalisme des RDPSG et les stratégies de CAC dans les réseaux mobiles cellulaires

Les chaînes de Markov et les files d'attente avec rappel étaient pendant longtemps le moyen standard utilisé pour analyser les performances des stratégies de CAC avec rappel dans les réseaux mobiles cellulaires. Cependant, l'introduction du phénomène de l'hétérogénéité, en plus de flux de rappel provoque d'énormes difficultés analytiques. Les réseaux de Petri stochastiques généralisés (*RDPSG*), constituent une alternative très puissante pour la représentation graphique, l'étude et l'analyse qualitative et quantitative des performances des systèmes avec rappel hétérogènes, et semble plus flexible comparée aux chaînes de Markov, ceci grâce à leur aptitude à représenter les phénomènes de blocage liés aux appels répétés, aux aspects de synchronisation, de concurrence, de parallélisme ainsi que d'autres phénomènes stochastiques dans un même modèle. Ainsi, un intérêt particulier a été accordé aux *RDPSG* dans le domaine de l'évaluation des performances des réseaux mobiles cellulaires[50].

Les *RDPSG* ont été utilisés pour l'étude des performances des stratégies de CAC dans les réseaux mobiles cellulaires par *Molina et al.* dans [105], [106] et [107]. Les auteurs de ces trois articles ont proposé un modèle de CAC sans la prise en considération des appels répétés et avec deux flux d'arrivées : les arrivées des nouveaux appels et les arrivées des appels de handovers. Pour la favorisation des appels de handovers, les auteurs ont proposé trois modèles différents pour trois politiques de favorisation : (i) la technique de la réservation des canaux gardiens, (ii) la politique de mise en file d'attente des appels de handovers bloqués, et (iii) la politique de mise en file d'attente des nouveaux appels et des appels de handovers. Les résultats ont montré la flexibilité de l'utilisation du formalisme des *RDPSG* pour l'étude des performances des différents modèles étudiés. Un travail similaire a été proposé dans [108], mais cette fois en utilisant les réseaux de Petri colorés. Il existe d'autres travaux qui utilisent les réseaux de Petri pour l'étude de performances dans les réseaux mobiles cellulaires, tels que les travaux de *Trivedi* sur les performances handovers, présentés dans [109], [110] et le travail présenté dans [111], où il a étudié les performances d'un mécanisme de CAC dans les systèmes *OFDMA*.

Malgré l'existence de différents travaux : [105], [106] et [107], aucun n'a considéré le phénomène de rappel des appels bloqués. Dans ce mémoire, nous proposons l'exploration d'une nouvelle alternative pour l'analyse et l'étude des performances des stratégies de CAC dans les réseaux mobiles cellulaires avec la prise en considération du phénomène des appels répétés, en utilisant les *RDPSG*.

#### 4.2.5 Modélisation avec RDPSG de la stratégie de CAC avec rappel des nouveaux appels, source finie et réservation de $g$ canaux gardiens

Dans cette section, nous allons présenter le *RDPSG* décrivant la stratégie de CAC avec réservation de  $g$  canaux gardiens, rappel des nouveaux appels bloqués et micro-cellule à population d'abonnés *finie*, dans les réseaux *SCNs*.

##### 4.2.5.1 Description du modèle

La figure 4.4 présente une modélisation possible d'une micro-cellule dans laquelle on dispose des canaux fiables, et un système de CAC avec rappel des nouveaux appels bloqués et réservation de  $g$  canaux gardiens à l'aide d'un *RDPSG*. Dans le cadre des réseaux *SCNs* où la *SB* est considéré à source de la population des abonnés *finie*, qui est représentée par le paramètre entier positif  $L$  qui apparaît dans le *RDPSG* comme le marquage initial de la place *ClientsLibres*.

Ce modèle est constitué de :

- La place *ClientsLibres* contient tous les abonnés libres (abonnés qui ne sont pas actifs : ne détiennent pas un canal et qui ne sont pas en attente dans l'orbite, *i.e.* qu'ils sont entraînés de demander un canal ou susceptible de demander un canal à tous moments) se trouvant à l'intérieur de la zone de couverture de la micro-cellule.
- La place *CondCANv* représente la condition de contrôle d'admission pour qu'une arrivée d'un nouvel appel libre puisse être servie. Ainsi, assure la synchronisation entre les arrivées des nouveaux appels et des appels répétés.
- La place *CondCAHo* représente la condition de contrôle d'admission pour qu'une arrivée d'un appel de handover puisse être servie.
- La place *ChoixNv* représente le choix fait par un nouvel appel bloqué, d'entrer en orbite ou de quitter le système.
- La place *OrbNv* contient les nouveaux appels en attente dans l'orbite.
- La place *CanLibres* représente l'ensemble des canaux libres de la micro-cellule.
- La place *ApEnCours* représente l'ensemble des canaux occupés *i.e.* le nombre des appels en cours de communication dans la micro-cellule (nouveaux et ou handovers).
- La transition *ArrivéeNv* représente l'arrivée d'un nouvel appel.
- La transition *ArrivéeHo* représente l'arrivée d'un appel de handover.
- La transition immédiate *DebHo* est associée au début de service d'un appel de handover.
- La transition immédiate *DebNv* est associée au début de service d'un nouvel appel.
- La transition immédiate *EchecHo* représente le blocage et l'échec d'un appel de handover qui a trouvé tous les canaux de la micro-cellule occupés.
- La transition immédiate *BlocNv* représente le blocage d'un nouvel appel qui a trouvé tous les canaux partagés occupés.
- La transition immédiate *RejOrbNv* représente l'entrée en orbite d'un nouvel appel bloqué ou d'un appel répété bloqué.
- La transition immédiate *QuitSysNv* correspond à la sortie du système d'un nouvel appel bloqué (cas d'un abonné impatient).
- La transition *Rappel* correspond à l'arrivée d'un rappel provenant d'un nouvel appel en orbite.
- La transition *FinAp* représente la fin d'un appel.

Initialement,  $L$  abonnés libres sont présents dans la zone de couverture de la micro-cellule, l'orbite est vide,  $C$  canaux sont libres et aucun appel ni en cours. Donc, le marquage initial  $M_0$  est :

$$M_0 = \{ (M(\text{ClientsLibres}), M(\text{CondCANv}), M(\text{CondCAHo}), M(\text{ChoixNv}), M(\text{OrbNv}), M(\text{CanLibres}), M(\text{ApEnCours})) \} = \{ L, 0, 0, 0, 0, C, 0 \}.$$

### Remarques

- Dans le modèle proposé, les transitions immédiates sont représentées par des traits et les transitions temporisées par des rectangles. D'autre part, nous supposons que les jetons restent comptabilisés dans la place en entrée d'une transition, tant que son franchissement n'est pas terminé.
- Nous supposons que l'arrivée d'un appel de handover depuis une cellule adjacente n'est pris en compte que lorsque l'abonné entre dans la zone de handover de la micro-cellule servante où il est considéré et comptabilisé parmi les abonnés libres de cette micro-cellule.

## 4.2. Évaluation des performances d'une stratégie de CAC avec rappel des nouveaux appels, source finie et $g$ canaux gardiens

Dans le modèle de *RDPSG*, on a deux flux d'arrivées : l'arrivée d'un nouvel appel est traduite par le franchissement de la transition *ArrivéeNv*, dont le taux de franchissement est égal à  $\lambda_F$  et l'arrivée d'un appel de handover est traduite par le franchissement de la transition *ArrivéeHo*, dont le taux de franchissement est égal à  $\lambda_H$ . La sémantique de service des deux transitions précédentes est à serveurs infinis (représentée graphiquement par le symbole  $\#$  à coté de la transition temporisée), parce que tous les abonnés libres peuvent générer des appels indépendamment les uns des autres. Le franchissement de la transition *ArrivéeNv* et de la transition *ArrivéeHo* génère un jeton dans la place *CondCANv* et *CondCAHo* respectivement.

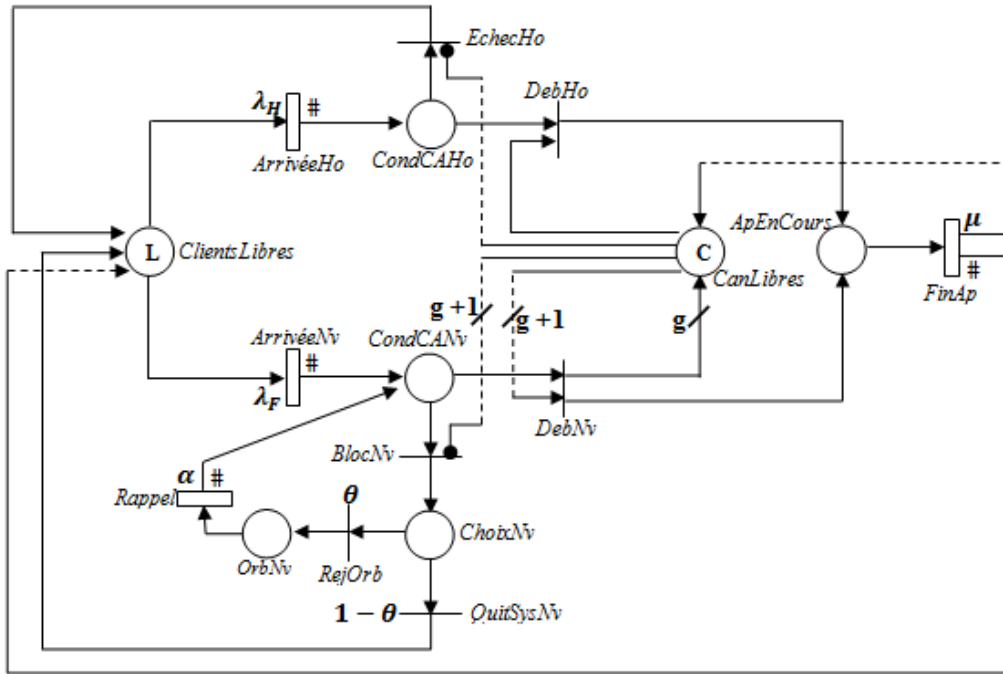


FIGURE 4.4 – RDPSG modélisant la stratégie de CAC avec rappel des nouveaux appels, réservation de  $g$  canaux gardiens et source finie.

À l'arrivée d'un nouvel appel ou d'un rappel d'un nouvel appel bloqué à la place *CondCANv* (resp. à l'arrivée d'un appel de handover à la place *CondCAHo*), si la place *CanLibres* contient au moins  $g+1$  jetons qui correspond à  $g+1$  canaux libres (resp. si la place *CanLibres* contient au moins un jeton qui correspond à un canal libre), la transition immédiate *DebNv* (resp. *DebHo*) sera tirée instantanément, et le marquage de la place *ApEnCours* sera incrémenté de 1. Ceci représente le fait que l'appel est accepté et une communication est en cours, aussi le fait qu'un canal est passé de l'état libre à l'état occupé (un jeton sera déplacé de la place *CanLibres* à la place *ApEnCours*). La condition de franchissement de la transition *DebNv* est représentée dans le *RDPSG* par un arc de poids égal à  $g + 1$  (au moins un canal est libre parmi les canaux partagés) reliant la place *CanLibres* à cette transition, et après le franchissement de cette dernière un jeton est consommé et les  $g$  jetons restants sont remis à la place *CanLibres* via un arc de poids égal à  $g$ . Par contre, si la place *CanLibres* contient au plus  $g$  jetons, *i.e.* aucun canal partagé n'est disponible, c'est plutôt la transition immédiate *BlocNv* qui sera tirée est par conséquent l'appel sera bloqué et il va rejoindre la place *ChoixNv*. Dans le *RDPSG*, la condition de franchissement de la transition *BlocNv* est représentée par un arc inhibiteur de poids égal à  $g+1$  reliant la place *CanLibres* à cette transition. Aussi, la condition de franchissement de la transition *DebHo* est représentée par un arc reliant la place *CanLibres* à cette transition. Si la place *CanLibres* ne contient aucun jeton, *i.e.* aucun canal n'est libre, la transition immédiate *EcheHo* sera sensibilisée et tirée. Par conséquent, l'appel sera perdu et l'abonné devient libre, après un jeton

sera généré dans la place *ClientsLibres*. La condition de franchissement de la transition *EchecHo* est représentée par un arc inhibiteur reliant la place *CanLibres* à cette dernière.

Le marquage de la place *ChoixNv* sensibilise les deux transitions concurrentes *QuitSysNv* et *RejOrbNv* :

- Le franchissement de la transition *RejOrbNv* avec une probabilité égale à  $\theta$ , signifie que l'appel va rejoindre l'orbite pour rappeler le service plus tard après un temps fini. Une fois en orbite, les nouveaux appels se comportent indépendamment les uns des autres, et rappellent pour le service après une période de temps distribuée exponentiellement avec un taux  $\alpha$ . Ainsi, la sémantique de la transition Rappel doit être à serveurs infinis, *i.e.* que le taux de tir est dépendant du marquage de la place *OrbNv*, ce qui est représenté par le symbole  $\sharp$  à coté de la transition *Rappel*. Dès le franchissement de cette transition temporisée, un jeton est déposé dans la place *CondCANv*. Ceci matérialise l'évènement du rappel d'un nouvel appel bloqué.
- Le franchissement de la transition *QuitSysNv* avec une probabilité égale à  $1 - \theta$ , signifie que le client est devenu impatient et il a décidé de quitter le système. Après le franchissement de cette transition le client va rejoindre l'ensemble des abonnés libres, cela est représenté dans le *RDPSG* par la génération d'un jeton dans la place *ClientsLibres*.

D'autre part, à la fin de la durée d'un appel (franchissement de la transition *FinAP*), un jeton sera déposé dans la place *CanLibres* pour représenter la fin d'un appel et la libération d'un canal, et un autre jeton représentant l'abonné qui devient libre est déposé dans la place *ClientsLibres*. Le franchissement de la transition *FinAp* est aussi à serveurs infinis, car tous les canaux sont parallèles est donc peuvent travailler simultanément.

#### 4.2.5.2 Analyse du RDPSG et indices de performances [112], [113]

Une fois le modèle de *RDPSG* est construit, son analyse consiste d'une part à définir ses propriétés qualitatives (comportementales et structurelles) telles que la bornitude, la vivacité, l'absence de blocage, etc., et d'autre part, à calculer ses paramètres de performances quantitatifs. En fait, l'analyse quantitative n'a de sens que si une analyse qualitative a été préalablement menée. Aussi, l'évaluation des performances à l'état stationnaire nécessite l'ergodicité du modèle, ce qui revient à vérifier certaines propriétés qualitatives.

Le *RDPSG* présenté dans la figure 4.4 est ergodique car il est borné (ensemble de marquages accessibles finis) et il admet l'état initial comme état d'accueil. Par conséquent, il admet un état stationnaire. Nous notons par  $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$  la distribution des probabilités de marquages à l'état stationnaire, où  $\pi_i$  est la probabilité que le processus soit à l'état  $M_i$ . Nous notons par  $A$  l'ensemble des marquages tangibles accessibles et par  $A(t)$  l'ensemble des marquages tangibles accessibles dans lesquels la transition  $t$  est franchissable.

En ayant les probabilités d'état stationnaire  $\pi$ , divers indices de performances intéressants peuvent être calculés dont les formules explicites sont données dans ce qui suit :

- Le nombre moyen des canaux occupés ( $n_o$ )  
Il correspond au nombre moyen des jetons dans la place *ApEnCours* (le nombre moyen des appels en cours de communication).

$$n_o = \sum_{i: M_i \in A} M_i(\text{ApEnCours}) \cdot \pi_i$$

4.2. Évaluation des performances d'une stratégie de CAC avec rappel des nouveaux appels, source finie et  $g$  canaux gardiens

---

- Le nombre moyen des canaux libres ( $n_L$ )  
Il correspond au nombre moyen des jetons dans la place *CanLibres*.

$$n_L = \sum_{i:M_i \in A} M_i(\text{CanLibres}).\pi_i$$

- Le nombre moyen des nouveaux appels en attente dans l'orbite ( $n_n$ )  
Il correspond au nombre moyen des jetons dans la place *OrbNv*.

$$n_n = \sum_{i:M_i \in A} M_i(\text{OrbNv}).\pi_i$$

- Le nombre moyen des abonnés dans la micro-cellule ( $n$ )  
Il correspond au nombre moyen d'abonnés en cours de communication plus le nombre moyen d'abonnés en attente dans l'orbite.

$$n = n_o + n_n.$$

- Le taux moyen d'arrivée des nouveaux appels ( $\bar{\lambda}_F$ )  
Il correspond à la fréquence (débit) de la transition *ArrivéeNv*.

$$\bar{\lambda}_F = \sum_{i:M_i \in A(\text{ArrivéeNv})} \lambda_F.M_i(\text{ClientsLibres}).\pi_i$$

- Le taux moyen d'arrivée des appels de handovers ( $\bar{\lambda}_H$ )  
Il correspond à la fréquence de la transition *ArrivéeHo*.

$$\bar{\lambda}_H = \sum_{i:M_i \in A(\text{ArrivéeHo})} \lambda_H.M_i(\text{ClientsLibres}).\pi_i$$

- Le taux moyen d'arrivée de rappel des nouveaux appels bloqués ( $\bar{\alpha}$ )  
Il correspond à la fréquence de la transition *Rappel*.

$$\bar{\alpha} = \sum_{i:M_i \in A(\text{Rappel})} \alpha.M_i(\text{OrbNv}).\pi_i$$

- Le taux moyen d'une communication ( $\bar{\mu}$ )  
Il correspond à la fréquence de la transition *FinAp*.

$$\bar{\mu} = \sum_{i:M_i \in A(\text{FinAp})} \mu.M_i(\text{ApEnCours}).\pi_i$$

- La probabilité de blocage d'un nouvel appel ( $P_{BN}$ )

$$P_{BN} = \frac{\sum_{j:M_j \in A} \sum_{i=1}^{L-(C-g)} .i.\lambda_F.Prob[M_j(\text{ClientsLibres}) = i \ \& \ M_j(\text{CanLibres}) \leq g]}{\bar{\lambda}_F}$$

- La probabilité de blocage d'un rappel d'un nouvel appel ( $P_{BRN}$ )

$$P_{BRN} = \frac{\sum_{j:M_j \in A} \sum_{i=1}^{L-(C-g)} .i.\alpha.Prob[M_j(\text{OrbNv}) = i \ \& \ M_j(\text{CanLibres}) \leq g]}{\bar{\alpha}}$$

### 4.3. Proposition d'une nouvelle stratégie de CAC avec canaux gardiens empruntables et une priorité de rappel (PFR-GCBS)

---

- La probabilité de blocage globale d'un nouvel appel ( $P_N$ )

$$P_N = \frac{\bar{\lambda}_F}{\bar{\lambda}_F + \bar{\alpha}} \cdot P_{BN} + \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\lambda}_F + \bar{\alpha}} \cdot P_{BRN}$$

- La probabilité de coupure d'un appel de handover ( $P_{BH}$ )

$$P_{BH} = \frac{\sum_{j: M_j \in A} \sum_{i=1}^{L-C} i \cdot \lambda_H \cdot \text{Prob}[M_j(\text{ClientsLibres}) = i \ \& \ M_j(\text{CanLibres}) = g]}{\bar{\lambda}_H}$$

- L'utilisation de  $s$  canaux ( $s$  appels sont en cours) ( $U_S$ )  
Ceci correspond à la probabilité que  $s$  ( $1 \leq s \leq C$ ) canaux sont occupés.

$$U_S = \sum_{i: M_i(\text{ApEnCours}) \geq s} \pi_i$$

- La disponibilité de  $s$  canaux ( $A_S$ )  
Ceci correspond à la probabilité que  $s$  ( $1 \leq s \leq C$ ) canaux sont oisifs.

$$A_S = \sum_{i: M_i(\text{CanLibres}) \geq s} \pi_i$$

- Le temps d'attente moyen d'un nouvel appel (le temps d'attente moyen pour qu'un nouvel appel passe avant d'être servi) ( $\bar{W}_F$ )  
Le temps d'attente (virtuel) d'un abonné correspond à la durée du temps entre l'arrivée d'un abonné et son début de service. Le temps d'attente moyen ( $\bar{W}_F$ ) à l'état stationnaire, peut être facilement obtenu à l'aide de la formule de *Little*.

$$\bar{W}_F = \frac{n_n}{\lambda_F}$$

- Le temps de réponse moyen (le temps passé par un appel dans le système) ( $\bar{R}$ )

$$\bar{R} = \frac{n}{\lambda}$$

Tel que :  $\lambda = \lambda_F + \lambda_H$ .

### 4.3 Proposition d'une nouvelle stratégie de CAC avec canaux gardiens empruntables et une priorité de rappel (PFR-GCBS)

Les stratégies de CAC basés sur la technique de la réservation des canaux gardiens garantissent une faible probabilité de coupure aux communications déjà établies. Cependant, cette uniformité ne tient pas compte du trafic qui peut exister dans une cellule, et engendre à la fois une augmentation du blocage des nouvelles communications et une perte du trafic offert. Pour cela, d'autres mécanismes complémentaires doivent être ajoutés pour faire face à ce problème. Remédier à cette problématique, est le principal objectif de notre solution.

En effet, dans certaines situations où la mobilité des abonnés est relativement limitée et les handovers sont moins fréquents, par exemple dans certaines périodes de la journée comme pendant la nuit, il se trouve que des nouveaux appels soient bloqués (faute de l'indisponibilité de canaux ordinaires libres) tandis que des canaux gardiens réservés exclusivement pour les appels de handovers sont non occupés. Ici, on est face à une mauvaise exploitation des ressources

### 4.3. Proposition d'une nouvelle stratégie de CAC avec canaux gardiens empruntables et une priorité de rappel (PFR-GCBS)

---

disponibles de la station de base.

Dans cette optique, nous proposons dans ce mémoire une nouvelle stratégie de contrôle d'admission des appels (*CAC*) pour les réseaux *SCNs* où les micro-cellules sont considérées à population d'abonnés finie, en nous basant sur un nouveau concept dit *d'emprunt des canaux gardiens* et une *priorité* de rappel des nouveaux appels bloqués, intitulée *Priority for Fresh call Retrial based on Guard Channel Borrowing Scheme (PFR-GCBS)*, en utilisant le formalisme des *RDPSG*. Le *PFR-GCBS* utilise la technique de la réservation des canaux gardiens pour la favorisation des appels de handovers avec la prise en considération du phénomène de rappel des nouveaux appels et celui de rappel des appels de handovers tout en donnant plus de priorité à ces derniers. La principale contribution de *PFR-GCBS* réside dans la *priorité* attribuée aux rappels des nouveaux appels bloqués par rapport aux nouveaux appels via l'incorporation du nouveau concept *d'emprunt de canaux gardiens* dans le système de *CAC*. Ce nouveau concept, repose sur une légère modification de la sémantique des canaux gardiens classiques de manière à ce qu'une partie  $t$  ( $t < g$ ) d'entre eux puisse être empruntée et allouée temporairement aux rappels des nouveaux appels (s'ils sont non utilisés) et après sa libération, le canal redevient comme canal gardien classique. La priorité de rappel des nouveaux appels peut être justifiée par le fait que le nouvel appel bloqué est le premier arrivé dans le système et il est toujours demandeur et en attente de service. Donc, il mérite d'être privilégié en ce qui concerne les chances d'accès au canal.

L'idée de cette nouvelle stratégie de *CAC* a été inspirée du travail présenté par *Alagu* et *Meyyappan* dans [36], dans lequel, une arrivée d'un nouvel appel qui trouve tous les canaux ordinaires occupés et un canal gardien libre, peut emprunter temporairement ce canal. Autrement dit un nouvel appel est bloqué s'il ne trouve aucun canal libre. Cependant, dans notre solution c'est le rappel qui détient ce privilège mais uniquement à une partie de l'ensemble des canaux gardiens non occupés.

Le but principale de la priorité affectée aux rappels des nouveaux appels bloqués est d'améliorer la probabilité de blocage globale des nouveaux appels et d'augmenter l'utilisation des canaux. Cependant, elle risque de générer dans certaines situations (arrivées intensives des appels de handovers) un léger effet négatif sur la probabilité de blocage des appels de handovers. Comme solution, nous proposons la prise en considération du rappel des appels de handovers bloqués. Parmi les travaux qui ont considéré le rappel des appels de handovers, nous citons : [94], [1], [96], [97], [99] et [100].

#### 4.3.1 Description de la nouvelle stratégie de CAC avec priorité de rappel (PFR-GCBS)

*PFR-GCBS* considère un réseau *SCN* avec une seule classe de service (appels téléphoniques de type voix) et utilise une allocation statique des canaux avec la réservation de  $g$  canaux gardiens. Dans *PFR-GCBS*, l'ensemble des canaux  $C$  d'une station de base est divisé en deux parties : une partie de  $n = C - g$  canaux *ordinaires* accessibles par tout le monde (nouveaux appels et appels de handovers), et une autre partie de  $g$  canaux *gardiens* réservés aux appels de handovers. La nouveauté présentée par *PFR-GCBS*, c'est que même les canaux gardiens sont divisés en deux parties en utilisant un seuil  $t$  (*Threshold*) appelé *seuil d'emprunt*, ainsi, une partie de  $t$  canaux gardiens dits *empruntables* ou *partageables*, est accessible par tous les appels de handovers avec la possibilité d'être empruntés temporairement par un rappel d'un nouvel appel bloqué s'ils sont non utilisés et une autre partie de  $g - t$  canaux gardiens dits *dédiés*, est réservée exclusivement pour les appels de handovers, voir la figure 4.5.

4.3. Proposition d'une nouvelle stratégie de CAC avec canaux gardiens empruntables et une priorité de rappel (PFR-GCBS)

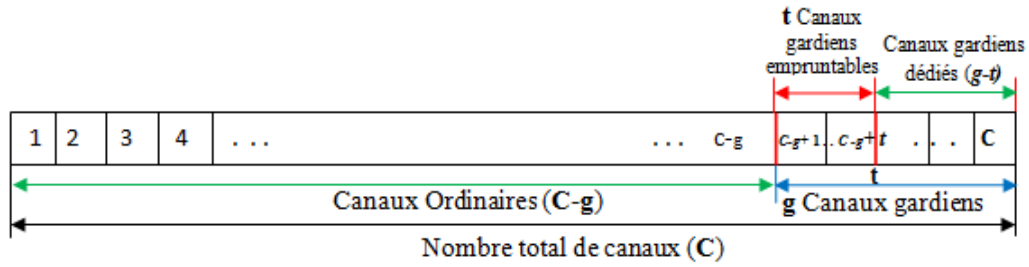


FIGURE 4.5 – Découpage de l'ensemble des canaux d'une micro-cellule selon la stratégie PFR-GCBS.

Dans ce qui suit, nous allons détailler seulement les nouveaux concepts spécifiques à la stratégie *PFR-GCBS*. Ainsi, la description mathématique du modèle de *CAC* présentée dans la section 4.2.1 reste valide.

D'après le modèle de *CAC* de la stratégie *PFR-GCBS*, plus de priorité est attribuée aux rappels des nouveaux appels, en leur permettant d'occuper non seulement les  $n = C-g$  canaux ordinaires, mais aussi ils ont la possibilité d'emprunter et d'utiliser temporairement un canal libre parmi un ensemble de  $t$  canaux gardiens empruntables, *i.e.* un rappel d'un nouvel appel peut accéder au total à  $(C-(g-t))$  canaux. Le rappel sera de nouveau bloqué s'il trouve au moins  $(C-(g-t))$  canaux occupés. Dans ce cas, l'appel va rejoindre une orbite virtuelle avec une probabilité égale à  $\theta_0$  ou quitte le système définitivement (abonné impatient) avec une probabilité égale à  $1 - \theta_0$ , voir la figure 4.6. Une arrivée d'un appel de handover qui trouve au moins un canal libre parmi l'ensemble  $C$  des canaux d'une micro-cellule est servie directement. Dans le cas où il trouve tous les canaux de la micro-cellule occupés, l'appel sera bloqué et il va rejoindre une orbite virtuelle pour rappeler le service après un temps fini distribué exponentiellement de taux  $\beta$ , avec une probabilité égale à  $\theta_1$  ou quitte le système définitivement (handover échoué) avec une probabilité égale à  $1 - \theta_1$ , dans le cas où le terminal mobile quitte la zone de handover ou la qualité du signal se dégrade au dessous du seuil de handover, voir la figure 4.6. Un rappel d'un appel de handover est traité de la même manière qu'une nouvelle requête d'un appel de handover. Nous supposons que la durée d'attente d'un appel de handover dans l'orbite est courte. La politique de *CAC* de *PFR-GCBS* attribue la priorité la plus élevée aux appels de handovers, après viennent les rappels des nouveaux appels bloqués avec une priorité raisonnables et enfin la plus petite priorité est affectée aux arrivées de nouveaux appels.

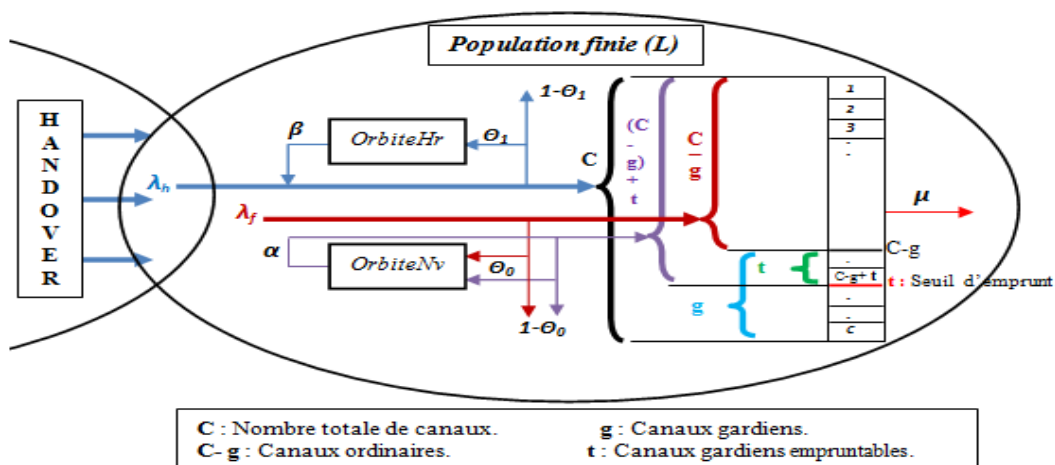


FIGURE 4.6 – Modèle de CAC de la stratégie PFR-GCBS.

4.3. Proposition d'une nouvelle stratégie de CAC avec canaux gardiens empruntables et une priorité de rappel (PFR-GCBS)

---

L'algorithme de CAC de la stratégie PFR-GCBS est le suivant :

---

**Algorithm 3:** L'algorithme de CAC de la stratégie PFR-GCBS.

---

$C$  : le nombre total de canaux d'une microcellule.  
 $g$  : le nombre de canaux gardiens.  
 $t$  : le nombre de canaux gardiens *empruntables*.  
 $C_R$  : le nombre de canaux partagés :  $C-g$ .  
 $D_N$  : le nombre de nouveaux appels bloqués.  
 $D_H$  : le nombre des appels de handovers bloqués.  
 $A_{enC}$  : le nombre des appels en cours.

1)  
**if** *requête d'appel de handover* **then**  
    **if**  $A_{enC} < C$  **then**  
         $A_{enC} = A_{enC} + 1$ ,  
        *Accorder l'admission,*  
    **else**  
         $D_H = D_H + 1$ ,  
        *Appel bloqué et diriger vers Orbite,*  
        **if** *Clients Impatients* **then**  
            *Quitter le système et rejeter l'appel.*  
        **else**  
            *Rappeler le service et aller à (1),*  
        **end**  
    **end**  
**end**

2)  
**if** *requête d'un nouvel appel* **then**  
    **if**  $A_{enC} < C_R$  **then**  
         $A_{enC} = A_{enC} + 1$ ,  
        *Accorder l'admission,*  
    **else**  
         $D_N = D_N + 1$ ,  
        *Appel bloqué et diriger vers Orbite,*  
        *Après un temps fini, Rappeler le service et aller à (3),*  
    **end**  
**end**

3)  
**if** *requête d'un rappel d'un nouvel appel* **then**  
    **if**  $A_{enC} < (C_R + t)$  **then**  
         $A_{enC} = A_{enC} + 1$ ,  
        *Emprunter canal et Accorder l'admission.,*  
    **else**  
        **if** *Clients Impatients* **then**  
            *Quitter système et appel rejeté avec une probabilité  $1-\theta$ .*  
        **else**  
             $D_H = D_H + 1$ ,  
            *Appel bloqué et diriger vers Orbite,*  
            *Après un temps fini, Rappeler le service et aller à (3),*  
        **end**  
    **end**  
**end**

---

### 4.3.2 Modélisation et analyse d'une micro-cellule avec la stratégie PFR-GCBS par RDPSG

Pour éviter toute répétition, nous détaillons dans cette section, que les points spécifiques à la nouvelle stratégie de CAC avec la priorité de rappel des nouveaux appels bloqués ainsi, les nouvelles places et les transitions ajoutées. Les places et les transitions ainsi que les variables définies dans la section précédente restent valides.

#### 4.3.2.1 Description du RDPSG

Le modèle de *RDPSG* décrit dans la figure 4.7 modélise une micro-cellule avec population d'abonnés *finie* dans laquelle on dispose d'un système de CAC avec rappel et une station de base composée de canaux fiables et canaux gardiens *empruntables*.

Ce modèle est constitué en plus du précédent de :

- La place *CondCANv* représente la condition de contrôle d'admission pour qu'une arrivée d'un nouvel appel libre puisse être servie.
- La place *CondEmp* représente la condition pour qu'un rappel d'un nouvel appel bloqué demande d'emprunter un canal.
- La place *ChoixNv* représente le choix fait par un nouvel appel (ou un rappel d'un nouvel appel) bloqué, d'entrer en orbite ou de quitter le système.
- La place *ChoixHo* représente le choix fait par un appel (ou rappel) handover bloqué, d'entrer en orbite ou de quitter le système.
- La place *OrbHo* contient les appels de handovers en attente dans l'orbite.
- La transition immédiate *EmpC* est associée au début d'un nouvel appel après l'emprunt d'un canal.
- La transition immédiate *BlocRap* représente l'échec d'une tentative d'emprunt du canal et le blocage d'un rappel d'un nouvel appel.
- La transition immédiate *BlocHo* représente le blocage d'un appel de handover.
- La transition immédiate *RejOrbHo* représente l'entrée en orbite d'un appel (*resp.* rappel) handover.
- La transition immédiate *QuitSysHo* (*EchecHo*) correspond à l'échec de l'opération de handover et la sortie du système d'un appel de handover.
- La transition *RapHo* correspond à l'arrivée d'un rappel provenant d'un appel de handover en orbite.

Initialement,  $L$  clients sont libres, les deux orbites sont vides,  $C$  canaux sont libres et aucun appel n'est en cours.

$$\begin{aligned} M_0 &= \{M(\text{ClientsLibres}), M(\text{CondCANv}), M(\text{ChoixNv}), M(\text{OrbNv}), M(\text{CondEmp}), \\ &\quad M(\text{CondCAHo}), M(\text{ChoixHo}), M(\text{OrbHo}), M(\text{CanLibres}), M(\text{ApEnCours})\} \\ &= \{L, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, C, 0\}. \end{aligned}$$

Dans ce qui suit, seulement les comportements spécifiques à la nouvelle stratégie de CAC seront détaillés.

À l'arrivée d'un appel de handover à la place *CondCAHo*, si la place *CanLibres* est vide : ne contient aucun canal libre, la transition immédiate *BlocHo* sera tirée et par conséquent l'appel sera bloqué et rejoint la place *ChoixHo*.

Le marquage de la place *ChoixNv* (*resp.* *ChoixHo*) sensibilise les deux transitions concurrentes *QuitSysNv* et *RejOrbNv* (*resp.* *QuitSysHo* et *RejOrbHo*) :

4.3. Proposition d'une nouvelle stratégie de CAC avec canaux gardiens empruntables et une priorité de rappel (PFR-GCBS)

- Le franchissement de la transition  $RejOrbNv$  (*resp.*  $RejOrbHo$ ) avec une probabilité égale à  $\theta_0$  (*resp.*  $\theta_1$ ), signifie que l'appel va rejoindre l'orbite des nouveaux appels (*resp.* orbite des handovers) pour rappeler le service plus tard après un temps fini et un jeton est généré dans la place  $OrbNv$  (*resp.*  $OrbHo$ ). Une fois en orbite, les nouveaux appels (*resp.* les appels de handovers) se comportent indépendamment les uns des autres, et rappellent le service après un temps distribué exponentiellement avec un taux  $\alpha$  (*resp.*  $\beta$ ). Ainsi, la sémantique de la transition  $RapNv$  (*resp.*  $RapHo$ ) doit être à serveurs infinis, *i.e.* que le taux de tir est dépendant de marquage de la place  $OrbNv$  (*resp.*  $OrbHo$ ), ce qui est représenté par le symbole  $\sharp$  à côté de la transition  $RapNv$  (*resp.*  $RapHo$ ). Dès le franchissement de cette dernière, un jeton est déposé dans la place  $CondEmp$  (*resp.*  $CondCAHo$ ). Ceci matérialise l'évènement du rappel d'un nouvel appel (*resp.* d'un appel de handover) en attente dans l'orbite.
- Le franchissement de la transition  $QuitSysNv$  (*resp.*  $QuitSysHo$ ) avec une probabilité égale à  $1 - \theta_0$  (*resp.*  $1 - \theta_1$ ), signifie que l'abonné est devenu impatient et il a décidé de quitter le système (*resp.* l'échec de l'opération de handover). Après le franchissement de cette transition l'abonné devient inactif (libre) et rejoint l'ensemble des abonnés libres présents dans la zone de couverture de la micro-cellule. Cela est représenté dans le *RDPSG* par la génération d'un jeton dans la place  $ClientsLibres$ .

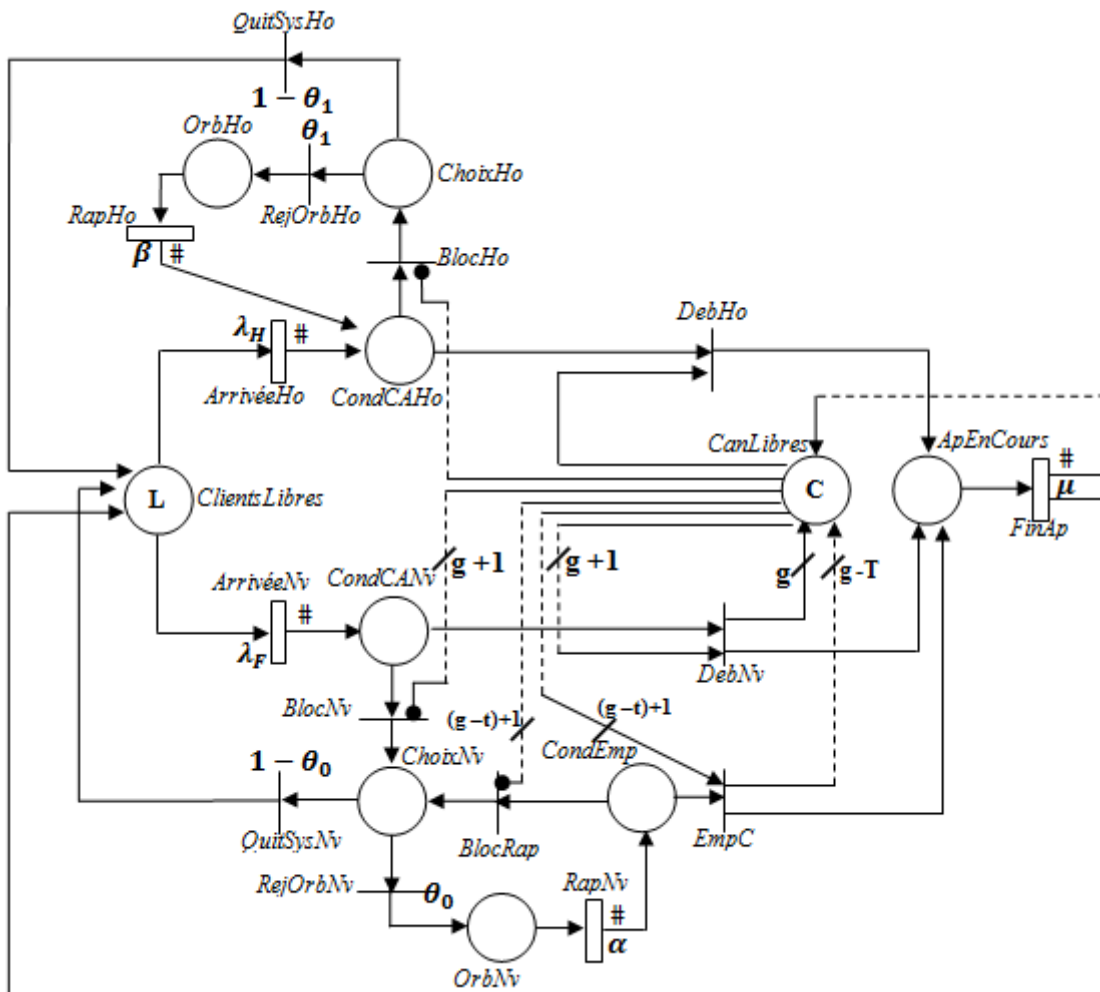


FIGURE 4.7 – RDPSG modélisant la stratégie PFR-GCBS.

Une fois le rappel d'un nouvel appel est dans la place CondEmp :

- S'il y a au moins un canal libre parmi les  $C-g$  canaux partagés, l'appel va être directement servi, sinon le rappel va encore chercher du côté des  $t$  canaux gardiens empruntables s'il trouve un canal libre. Si c'est le cas, le rappel va emprunter et occuper ce canal. Cela est décrit dans le *RDPSG* par le franchissement de la transition immédiate *EmpC*. La condition de franchissement de cette transition est donc représentée par un arc de poids égal à  $((g-t) + 1)$  reliant la place *CanLibres* à cette dernière. Après le tir de la transition *EmpC* un jeton sera consommé, un jeton est produit dans la place *ApEnCours*, ce qui signifie qu'un canal gardien ou ordinaire est passé de l'état libre vers l'état occupé et les  $g-t$  jetons restants sont remis dans la place *CanLibres*.
- Dans le cas où tous les canaux partagés sont occupés et il y a aucun canal gardien empruntable libre (au plus  $g-t$  canaux libres), le rappel sera de nouveau bloqué. Cela est représenté dans le *RDPSG* par le franchissement de la transition immédiate *BlocRap* ce qui représente l'échec de l'emprunt du canal et la condition de franchissement est représentée par un arc inhibiteur de poids égal à  $(g-t) + 1$  reliant la place *CanLibres* à la transition *BlocRap*. Le tir de cette dernière génère un jeton dans la place *ChoixNv*.

#### 4.3.2.2 Analyse du RDPSG et indices de performances [114]

Le modèle de *RDPSG* présenté dans la figure 4.7 est borné (ensemble de marquages accessibles fini), vivant, sans blocage et il admet le marquage initial comme état d'accueil.

Pour éviter toute répétition, nous donnons dans ce qui suit, que les indices de performance ayant rapport avec la nouvelle stratégie de *CAC*, les indices définis dans la section précédente restent valides.

- Le nombre moyen des appels de handovers en attente dans l'orbite ( $n_h$ )  
Il correspond au nombre moyen de jetons dans la place *OrbHo*.

$$n_h = \sum_{i: M_i \in A} M_i(OrbHo) \cdot \pi_i$$

- Le nombre moyen des abonnés dans la micro-cellule ( $n$ )  
Il correspond au nombre moyen d'abonnés en cours de communication plus le nombre moyen d'abonnés en attente dans l'orbite (nouveaux et handovers).

$$n = n_0 + n_n + n_H$$

- Le taux moyen d'arrivée de rappel des appels de handovers bloqués ( $\bar{\beta}$ )  
Il correspond à la fréquence de la transition *RapHo*.

$$\bar{\beta} = \sum_{i: M_i \in A(RapHo)} \beta \cdot M_i(OrbHo) \cdot \pi_i$$

- La probabilité de blocage d'un rappel d'un nouvel appel bloqué ( $P_{BRN}$ )

$$P_{BRN} = \frac{\sum_{j: M_j \in A} \sum_{i=1}^{L-(C-(g-t))} i \cdot \alpha \cdot \text{Prob}[M_j(OrbNv) = i \ \& \ M_j(CanLibres) \leq (g-t)]}{\bar{\alpha}}$$

- La probabilité de blocage d'un rappel de handover ( $P_{BRH}$ )

$$P_{BRH} = \frac{\sum_{j:M_j \in A} \sum_{i=1}^{L-C} i \cdot \beta \cdot \text{Prob}[M_j(\text{OrbHo}) = i \ \& \ M_j(\text{CanLibres}) = 0]}{\bar{\beta}}$$

- La probabilité de blocage d'un appel de handover ( $P_H$ )

$$P_H = \frac{\bar{\lambda}_H}{\bar{\lambda}_H + \bar{\beta}} \cdot P_{BH} + \frac{\bar{\beta}}{\bar{\lambda}_H + \bar{\beta}} \cdot P_{BRH}$$

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux modèles décrivant deux stratégies de *CAC* avec rappel, source d'abonnés finie et canaux gardiens pour étudier les performances des réseaux *SCNs*.

Dans une première partie, nous avons proposé la modélisation d'un mécanisme de *CAC* avec rappel, source finie et  $g$  canaux gardiens, à l'aide du formalisme des chaînes de Markov à temps continu puis à l'aide des *RDPSG*. Pour le calcul des probabilités d'états, nous avons proposé et utilisé une généralisation de l'algorithme de *Tran-Gia* et *Mandjes* [1] à un nombre quelconque de canaux gardiens tout en considérant une population d'abonnés finie. Dans une seconde partie, nous avons proposé une nouvelle stratégie de *CAC* avec priorité de rappel des appels bloqués initiés dans la micro-cellules et canaux gardiens empruntables à l'aide du formalisme des *RDPSG*.

Les *RDPSG* sont un outil graphique et mathématique très performant qui permet la représentation des différentes caractéristiques des systèmes parallèles. Ils ont une forte puissance d'expression et de description qui nous a permis d'obtenir des modèles simples qui incluent différents événements (source finie, deux flux d'arrivées, service parallèle, rappels et canaux gardiens). Un autre avantage essentiel de ce formalisme est le fait de pouvoir définir des formules permettant le calcul des principaux paramètres de performances du réseau.

Le chapitre suivant sera consacré à l'implémentation des modèles de *CAC* avec rappel et canaux gardiens proposés auparavant, ainsi qu'à l'analyse des résultats obtenus.

# CHAPITRE 5

## IMPLÉMENTATION ET EXPÉRIMENTATION

### 5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'implémentation et la mise en œuvre de modèles de contrôle d'admission des appels (*CAC*) avec la prise en considération des appels répétés, source finie et canaux gardiens, proposés dans le chapitre précédent.

En effet, vu l'important effet négatif que représente le phénomène de rappel sur les mesures de performances du réseau, nous donnons un intérêt particulier à l'étude de l'impact de ce phénomène sur les performances des modèles étudiés. D'autre part, nous montrons l'influence des différents paramètres du réseau sur les indices de performances les plus significatifs, notamment la probabilité de blocage des nouveaux appels, celle des appels de handovers et le nombre moyen de canaux occupés.

Ainsi, dans le cadre de cette étude expérimentale, nous exposons les différents résultats numériques issus de deux cas d'études : *(i)* l'étude du modèle de *CAC* avec rappel, source finie et réservation de  $g$  canaux gardiens, en utilisant un outil logiciel d'évaluation des performances développé dans le cadre de ce travail pour le calcul numérique des résultats; *(ii)* l'étude de la nouvelle stratégie de *CAC* avec la priorité de rappel et canaux gardiens empruntables, en utilisant l'outil software GreatSPN version 2.0.2 [117] pour le calcul des résultats numériques. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de graphes, qui sont commentés et à partir desquels des conclusions sont tirées.

### 5.2 Étude de cas du modèle de *CAC* avec rappel, source finie et réservation de $g$ canaux gardiens

Dans cette section, nous allons présenter l'implémentation du modèle de *CAC* avec rappel, source finie et  $g$  canaux gardiens, ainsi que les différentes expériences, les différents résultats numériques et les conclusions tirées. Les résultats numériques obtenus sont calculés par le biais d'un outil logiciel d'évaluation des performances développé dans le cadre de ce travail, en utilisant l'algorithme proposé et présenté dans le chapitre précédent (section 4.2.2.2).

### 5.2.1 Présentation de l'environnement de l'outil d'évaluation des performances

Nous avons développé un outil logiciel d'évaluation des performances des modèles de *CAC* avec rappel, source finie et  $g$  canaux gardiens, qui permet de faire une évaluation quantitative en calculant les différents paramètres de performances. Pour cela, nous avons utilisé le langage de programmation JAVA et l'IDE (Integrated Development Environment) *Eclipse* sous le système *Windows*. JAVA est un langage de programmation orienté objet, structuré et multi-plateformes. Il offre des outils et des fonctionnalités utiles au développement d'un environnement convivial et interactif. La fenêtre principale de cet outil logiciel est représentée dans la figure 5.1.

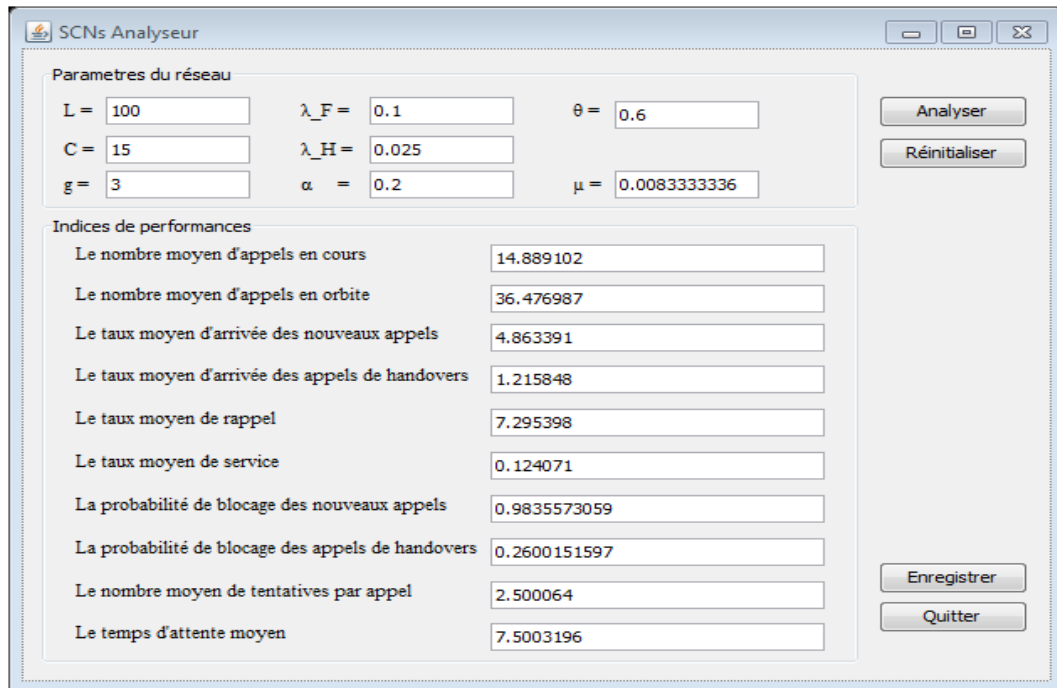


FIGURE 5.1 – La fenêtre principale de l'outil d'analyse des performances de modèle de *CAC* avec rappel, source finie et  $g$  canaux gardiens dans les réseaux *SCNs*.

### 5.2.2 Étude expérimentale

Nous présentons dans ce qui suit, une série d'expérimentations qui vise à étudier l'effet des paramètres du réseau sur les différentes mesures de performances. Les paramètres du réseau sont :

- La taille de la source ( $\mathbf{L}$ ) = 100 ;
- Le nombre de canaux ( $\mathbf{C}$ ) = 15 ;
- Le nombre de canaux gardiens ( $\mathbf{g}$ ) = 3 ;
- L'intervalle de temps moyen entre deux arrivées de nouveaux appels est de 10s, *i.e.*, le taux d'arrivée moyen des nouveaux appels ( $\lambda_F$ ) = 0.1 ;
- L'intervalle de temps moyen entre deux arrivées des appels de handovers est de 40s, *i.e.*, le taux d'arrivée moyen des appels de handovers ( $\lambda_H$ ) = 0.025 ;
- L'intervalle de temps moyen entre deux arrivées de rappels est de 5s, *i.e.*, le taux de rappel de nouveaux appels ( $\alpha$ ) = 0.2 ;
- La probabilité d'entrée en Orbite (le degré de persévérance) ( $\theta$ ) = 0.6 ;
- La durée moyenne d'une communication est de  $(1/\mu) = 120$ s, *i.e.*, le taux de service ( $\mu$ ) = 0.00834.

### 5.2.2.1 La probabilité de blocage des appels en fonction du taux d'arrivée

Dans les figures 5.2 et 5.3, nous présentons l'effet que génère la variation du taux d'arrivée des appels dans le système (le taux d'arrivée des nouveaux appels ( $Ta_N$ ) et le taux d'arrivée des appels de handovers ( $Ta_H$ )) sur la probabilité de blocage des appels (la probabilité de blocage des nouveaux appels ( $Pb_N$ ) et celle de blocage des appels de handovers ( $Pb_H$ )), ainsi, nous illustrons cet effet pour différentes expériences dans lesquelles le nombre de canaux gardiens ( $g$ ) égal à 1, 2, 3 et 4.

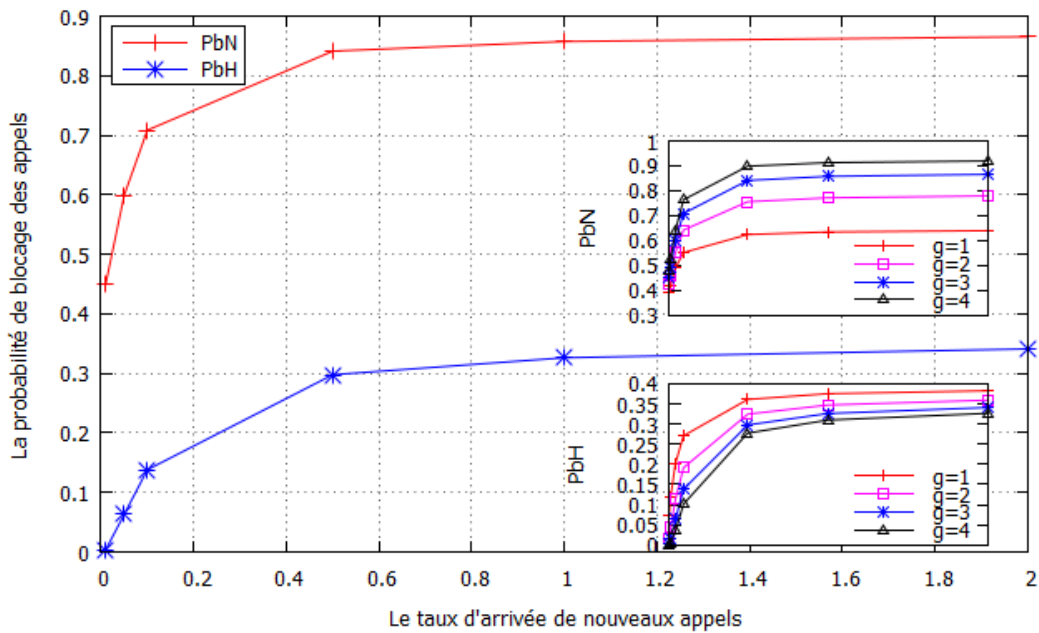


FIGURE 5.2 – La probabilité de blocage des appels en fonction du taux d'arrivée de nouveaux appels.

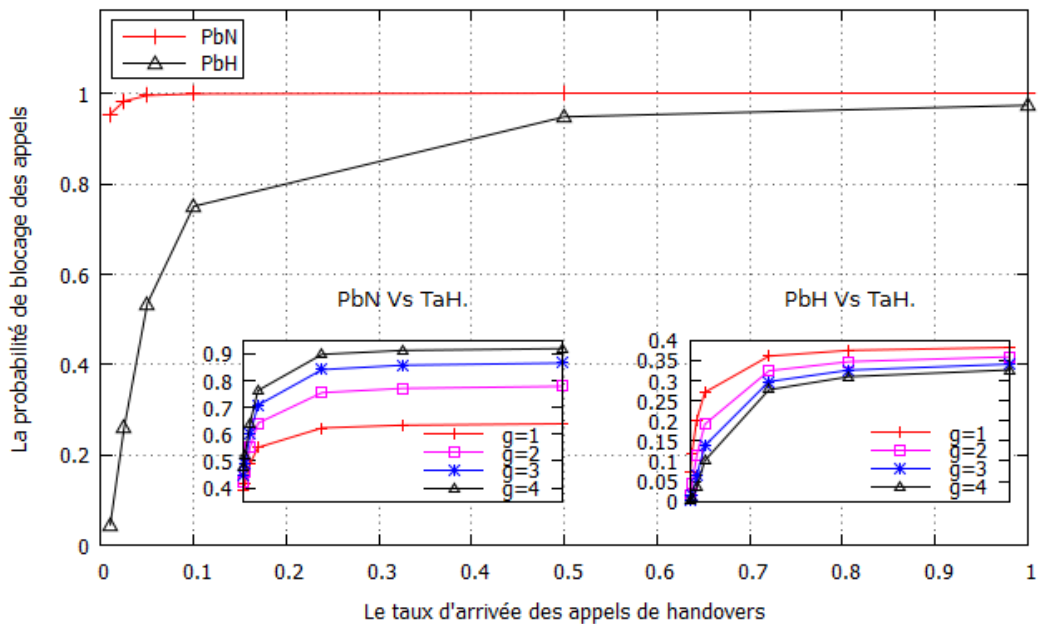


FIGURE 5.3 – La probabilité de blocage des appels en fonction du taux d'arrivée des appels de handovers.

## 5.2. Étude de cas du modèle de CAC avec rappel, source finie et réservation de $g$ canaux gardiens

Comme nous pouvons le constater, la probabilité de blocage des appels croît avec la croissance du taux d'arrivée des appels dans le réseau. Aussi, la probabilité de blocage des appels de handovers est inférieure à celle des nouveaux appels et elle est très sensible à l'augmentation du taux moyen d'arrivée des appels de handovers. De plus, d'après les différentes expériences de la variation du nombre de canaux gardiens ( $g$ ), nous remarquons que la courbe relative au plus grand nombre de canaux gardiens ( $g$ ) correspond à la plus petite probabilité de blocage des appels de handovers d'une part et la plus grande probabilité de blocage des nouveaux appels d'autre part. Ceci, peut être justifié par l'effet du concept des canaux gardiens. En effet, plus nous réservons des canaux gardiens aux appels de handovers moins est le nombre de canaux disponibles pour servir les nouveaux appels.

### 5.2.2.2 La probabilité de blocage des appels en fonction du taux de rappel

Dans la figure 5.4, nous illustrons l'effet que génère la variation du taux moyen de rappel sur la probabilité de blocage des appels pour différentes expériences dans le nombre de canaux gardiens ( $g$ ) égal à 1, 2, 3 et 4.

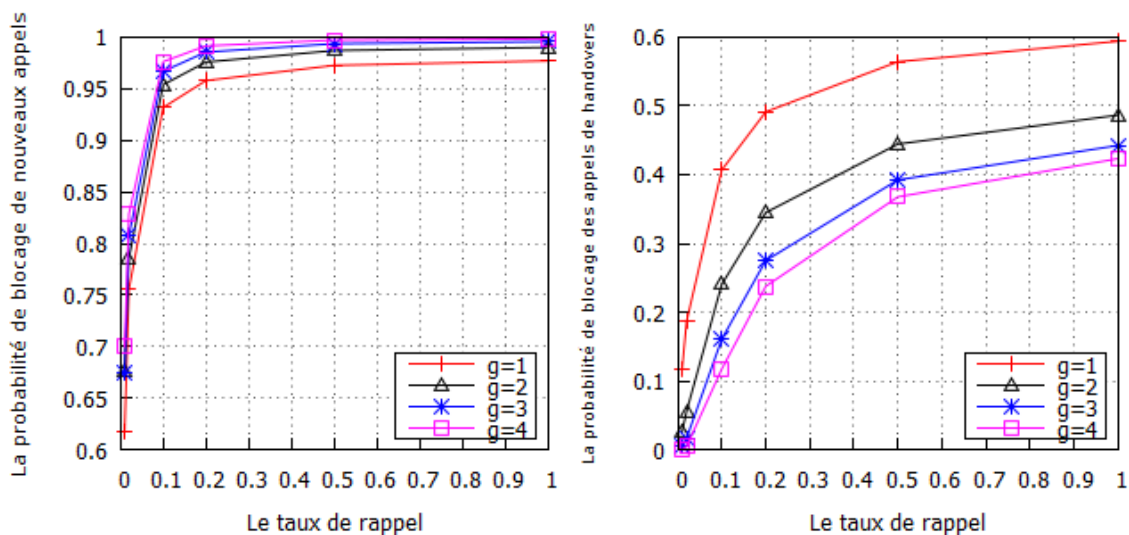


FIGURE 5.4 – La probabilité de blocage des appels en fonction du taux de rappel.

Comme nous le constatons, la probabilité de blocage des appels (la probabilité de blocage des nouveaux appels et celle de blocage des appels de handovers) croît de manière significative avec la croissance du taux d'arrivée de rappel. Lorsque le taux de rappel augmente, le temps moyen entre deux rappels successifs et celui d'attente dans l'orbite diminue, ainsi le système reçoit plus de flux d'appels et par conséquent la probabilité de blocage des appels augmente.

Cette expérimentation confirme les résultats de [1], et montre l'important impact négatif que représente le phénomène de rappel sur les performances du réseau, c'est pourquoi il n'est pas question d'ignorer ce paramètre lors de l'étude des performances des réseaux mobiles cellulaires.

### 5.2.2.3 L'influence de la taille de la population de la micro-cellule sur la probabilité de blocage des appels

Dans la figure 5.5, nous reproduisons la même expérience précédente, mais cette fois avec des expériences sur différentes taille de la population d'une micro-cellule ( $L$ ), afin de montrer l'influence que représente la taille de la population sur la probabilité de blocage des appels.

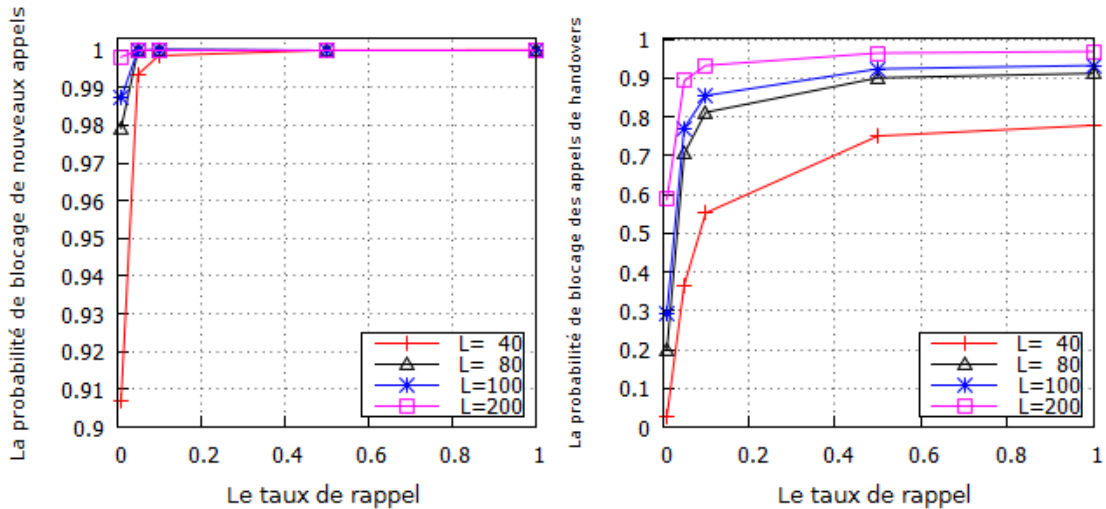


FIGURE 5.5 – L’influence de la taille de la population de la micro-cellule sur la probabilité de blocage des appels.

Nous remarquons que l’augmentation de la taille de la population ( $L$ ) augmente la probabilité de blocage des appels (celle de blocage des nouveaux appels et celle de blocage des appels de handovers), ainsi, les plus mauvais résultats en terme de la probabilité de blocage correspondent à la plus grande taille de la population et les meilleurs résultats correspondent à la plus petite taille de la population. L’augmentation de la taille de la population d’une micro-cellule, augmente le nombre d’abonnés qui disputent l’accès aux ressources disponibles d’une micro-cellule et par conséquent, augmente le risque pour qu’une nouvelle arrivée d’un appel se bloque.

Cette expérimentation, confirme les résultats de [94], et montre que les micro-cellules avec une population d’abonné petite (relativement finie) fournissent de meilleures performances en termes de la probabilité de blocage des appels (meilleure QoS) que les micro-cellules avec une grande population (relativement infinie).

#### 5.2.2.4 Les performances du réseau en fonction du nombre de canaux gardiens

Dans les figures 5.6 et 5.7, nous illustrons l’influence de la variation du nombre de canaux gardiens ( $g$ ) sur les mesures de performances du réseau les plus significatives : la probabilité de blocage des appels (celle de blocage des nouveaux appels (PbN) et celle de blocage des appels de handovers (PbH)) et sur le nombre moyen d’appels dans le système (les appels bloqués en attente dans l’orbite et les appels en cours de communication). En effet, nous constatons très clairement que la variation du nombre de canaux gardiens ( $g$ ) a une grande influence sur les performances du système, ainsi nous remarquons d’après les courbes dans les deux expériences que l’augmentation du nombre de canaux gardiens ( $g$ ) permet de réduire d’une manière significative la probabilité de blocage des appels de handovers, autant qu’elle augmente celle de blocage des nouveaux appels et réduit le nombre moyen de canaux occupés (le nombre moyen d’appels en cours de communications). Par conséquent, le nombre moyen d’appels bloqués en attente dans l’orbite augmente. Cela, peut être justifié par l’effet du concept des canaux gardiens. Plus nous réservons des canaux gardiens aux appels de handovers moins est le nombre de canaux disponibles pour servir les nouveaux appels. De plus, nous remarquons que la réservation d’un petit nombre de canaux, permet d’améliorer considérablement la probabilité de blocage des appels de handovers sans trop affecter celle de blocage des nouveaux appels.

5.3. Etude de cas de la nouvelle stratégie de CAC avec canaux gardiens empruntables et priorité de rappel (*PFR-GCBS*)

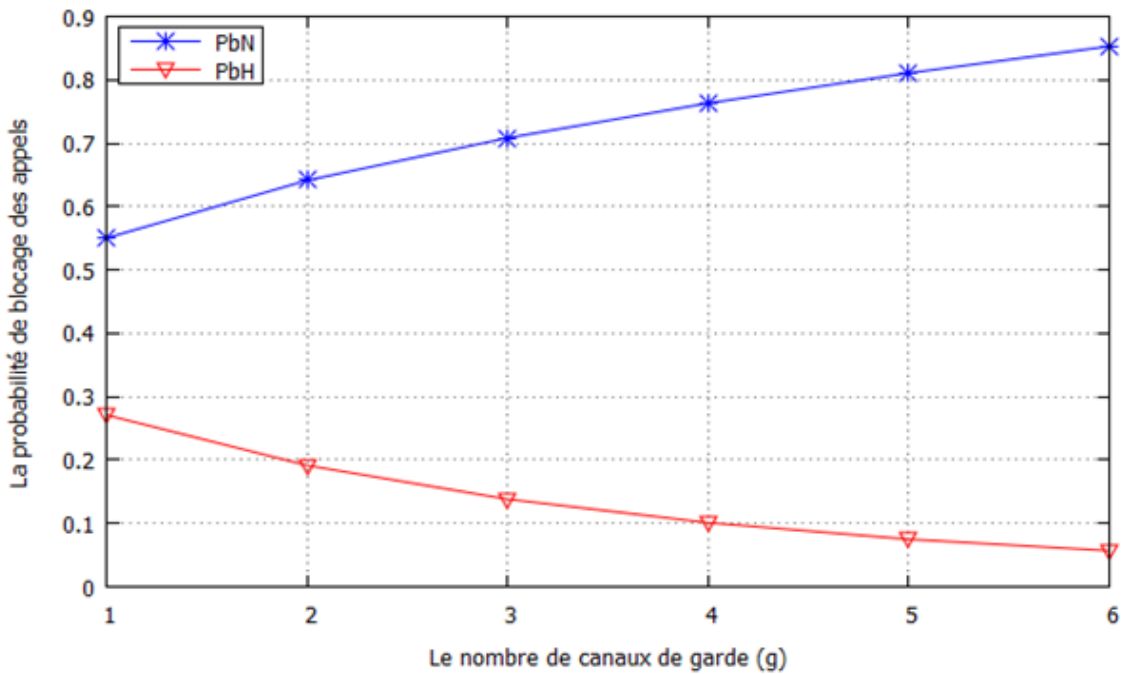


FIGURE 5.6 – La probabilité de blocage des appels en fonction du nombre des canaux gardiens (g).

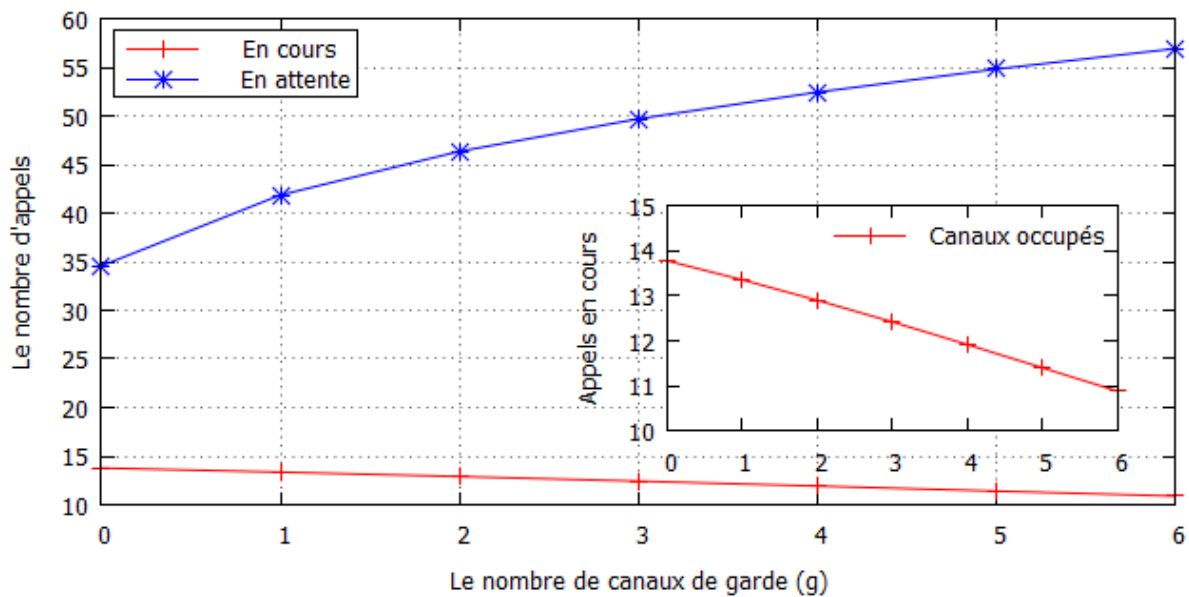


FIGURE 5.7 – Le nombre d'appels dans le système en fonction du nombre des canaux gardiens (g).

### 5.3 Etude de cas de la nouvelle stratégie de CAC avec canaux gardiens empruntables et priorité de rappel (*PFR-GCBS*)

Dans le cadre de cette étude expérimentale, les résultats numériques ont été calculés en utilisant l'outil software GreatSPN version 2.0.2, qui est un outil très performant principalement dédié à l'évaluation des performances.

### 5.3.1 Description du GreatSPN [50]

GreatSPN (GRaphical Editor and Analyzer for Timed and Stochastic Petri Nets) [117], est un puissant outil graphique software qui permet la spécification, la validation et l'évaluation des performances des systèmes distribués, en utilisant le formalisme des *RDP* stochastiques généralisés et leur extension colorés : les *RDPS* bien-formés.

Développé à l'université de Torino en Italie, par un groupe de chercheurs qui travaillaient sur les *RDPSG* et l'évaluation des performances, il est distribué gratuitement à d'autres universités pour des buts pédagogiques et des expérimentations dans le cadre de la recherche. La première version de cet outil software a été développée avec le langage de programmation *C* sous le système *Unix* en 1984, cette version a été suivie de plusieurs autres versions plus améliorées, dont la dernière est la version 2.0.2.

Les principales fonctions et techniques d'analyse implémentées dans l'outil GreatSPN sont :

- Interface graphique simple à manipuler qui permet à l'utilisateur la saisie du modèle correspondant au système à analyser. Ce choix s'explique par la nature graphique des représentations du formalisme de *RDP* ;
- Vérification des propriétés structurelles ;
- Calcul des bornes de performance (bornes supérieures et inférieures) à l'aide de la programmation linéaire (pour les modèles non-colorés) ;
- Généralisation et analyse du graphe d'accessibilité pour le *RDPSG* et du graphe d'accessibilité symbolique pour les réseaux colorés bien-formés ;
- Résolution markovienne qui permet l'évaluation des performances stationnaires aussi bien que transitoires, en exploitant des techniques numériques matricielles efficaces ;
- Simulation : dans ce cas, plusieurs distributions de probabilité.

La figure 5.8 montre l'implémentation de la stratégie *PFR-GCBS* sous GreatSPN 2.0.2.

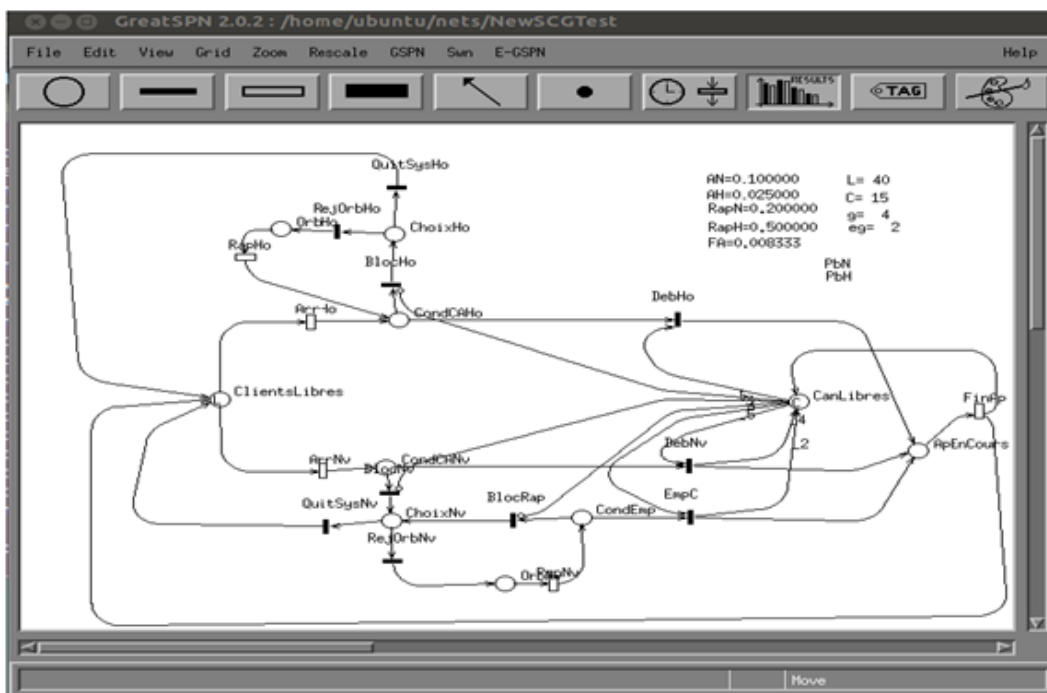


FIGURE 5.8 – L'implémentation du modèle de la stratégie *PFR-GCBS* sous GreatSPN 2.0.2.

L'outil GreatSPN, est caractérisé par la facilité d'utilisation, la portabilité, la modularité et l'efficacité des modules et des algorithmes d'analyse. En effet, comparé à d'autres outils comme : SPNP (Stochastic Petri Net Package), TOMSPIN (TOol for Modeling with Stochastic Petri Nets), TimeNET, Ultra-Sab, etc, GreatSPN offre un environnement de modélisation et d'analyse plus complet, ce qui permet son utilisation dans des applications complexes et volumineuses ayant un espace d'états important.

### 5.3.2 Étude expérimentale

Nous présentons dans ce qui suit, une série d'expérimentations qui vise à étudier l'effet des paramètres du réseau sur les différentes mesures de performances. Les paramètres du modèle analysé dans la section précédente restent valides et nous citons dans ce qui suit uniquement les nouvelles valeurs des paramètres spécifiques à la stratégie *PFR-GCBS* :

- La taille de la source ( $L$ ) = 40 ;
- Le nombre de canaux gardiens ( $g$ ) = 4 ;
- Le nombre de canaux gardiens empruntables ( $t$ ) = 2 ;
- L'intervalle de temps moyen entre deux arrivées de rappels d'un appel de handover est de 2s, *i.e.*, le taux moyen de rappel des appels de handovers ( $\beta$ ) = 0.5 ;
- La probabilité d'entrée en Orbite des appels de handovers ( $\theta_1$ ) = 0.8 ;
- Le taux de service ( $\mu$ ) = 0.0834.

Dans la série d'expérimentations présentées ci-après, nous comparons les performances de la stratégie *PFR-GCBS* avec ceux de la stratégie basique de CAC avec canaux gardiens et la prise en considération du rappel des nouveaux appels bloqués et celui des appels de handovers bloqués, qui nous appelons par convention : *Basic Guard Channel Scheme (BGCS)*.

#### 5.3.2.1 La probabilité de blocage des appels en fonction du taux d'arrivée des nouveaux appels

Dans la figure 5.9, nous illustrons l'effet que génère la variation du taux d'arrivée des nouveaux appels sur la probabilité de blocage des appels.

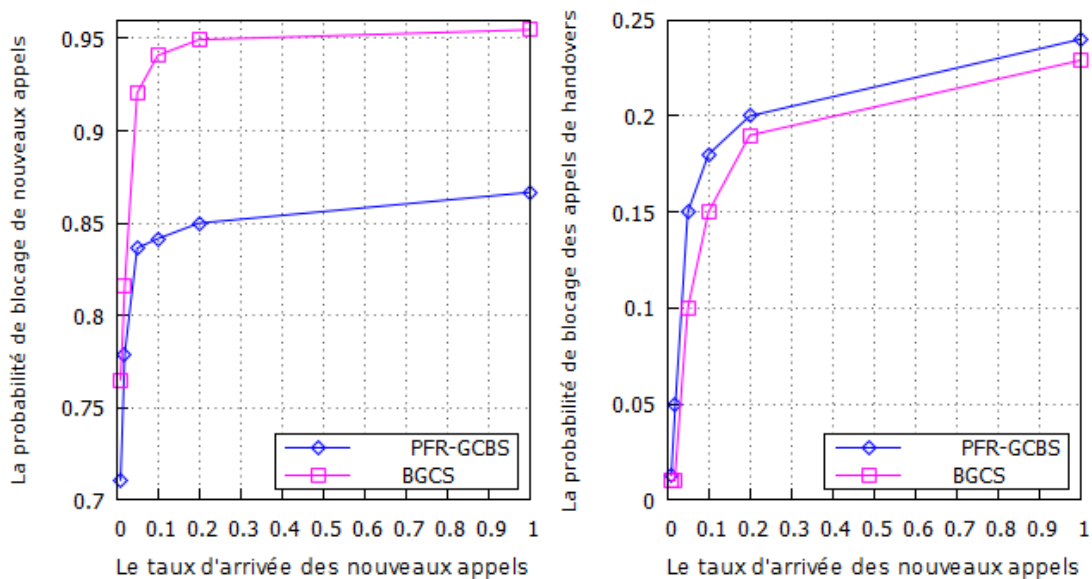


FIGURE 5.9 – La probabilité de blocage des appels en fonction du taux d'arrivée de nouveaux appels.

### 5.3. Etude de cas de la nouvelle stratégie de CAC avec canaux gardiens empruntables et priorité de rappel (*PFR-GCBS*)

Comme nous pouvons le constater, la probabilité de blocage des appels (celle de blocage des nouveaux appels et celle de blocage des appels de handovers) croît avec la croissance du taux d'arrivée des nouveaux appels dans le réseau. Ainsi, nous remarquons que la probabilité de blocage des nouveaux appels dans la nouvelle stratégie *PFR-GCBS* est beaucoup moins importante que celle dans la stratégie *BGCS*. En revanche, Celle de blocage des appels de handovers dans la nouvelle stratégie *PFR-GCBS* est légèrement supérieure à celle dans la stratégie *BGCS*.

Quand le temps moyen entre deux arrivées successives diminue le taux d'arrivée augmente, et par conséquent la probabilité de blocage des appels augmente. Aussi, la nouvelle stratégie *PFR-GCBS* via le concept d'emprunt des canaux gardiens permet de diminuer significativement la probabilité de blocage des nouveaux appels, mais, avec un tout léger effet négatif sur la probabilité de blocage des appels de handovers surtout dans le cas où des canaux gardiens sont empruntés aux nouveaux appels et un appel de handover arrive.

#### 5.3.2.2 La probabilité de blocage des appels en fonction du taux d'arrivée des appels de handovers

Dans la figure 5.10, nous illustrons l'effet que génère la variation du taux d'arrivée des appels de handovers sur la probabilité de blocage des appels.

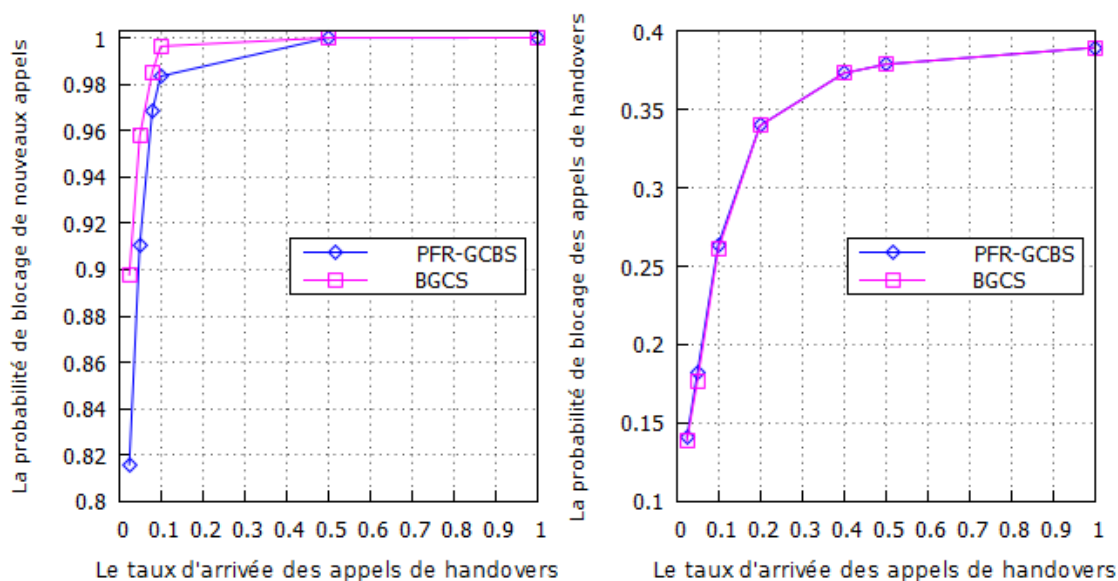


FIGURE 5.10 – La probabilité de blocage des appels en fonction du taux d'arrivée des appels de handovers.

Comme nous pouvons le constater, la probabilité de blocage des appels (celle de blocage des nouveaux appels et celle de blocage des appels de handovers) croît avec la croissance du taux d'arrivée des appels de handovers dans le réseau. Ainsi, la probabilité de blocage des nouveaux appels dans la nouvelle stratégie *PFR-GCRS* est plus faible que celle dans la stratégie *BGCS*. Cette influence est plus significative quand l'intensité d'arrivée est faible et négligeable pour des taux plus importants. De son côté, la probabilité de blocage des appels de handovers est presque identique dans les deux stratégies de *CAC*.

Lorsque le taux d'arrivée des appels de handovers augmente, le temps moyen entre deux arrivées successives diminue et la probabilité d'avoir des canaux gardiens oisifs diminue, cela

### 5.3. Etude de cas de la nouvelle stratégie de CAC avec canaux gardiens empruntables et priorité de rappel (*PFR-GCBS*)

implique moins de canaux gardiens empruntables, ce qui minimise l'effet de la stratégie *PFR-GCRS* et augmente la probabilité de blocage.

#### 5.3.2.3 La probabilité de blocage des appels en fonction du taux de rappel des nouveaux appels

Dans la figure 5.11, nous illustrons l'effet que génère la variation du taux de rappel des nouveaux appels sur la probabilité de blocage des nouveaux appels et celle de blocage des appels de handovers.

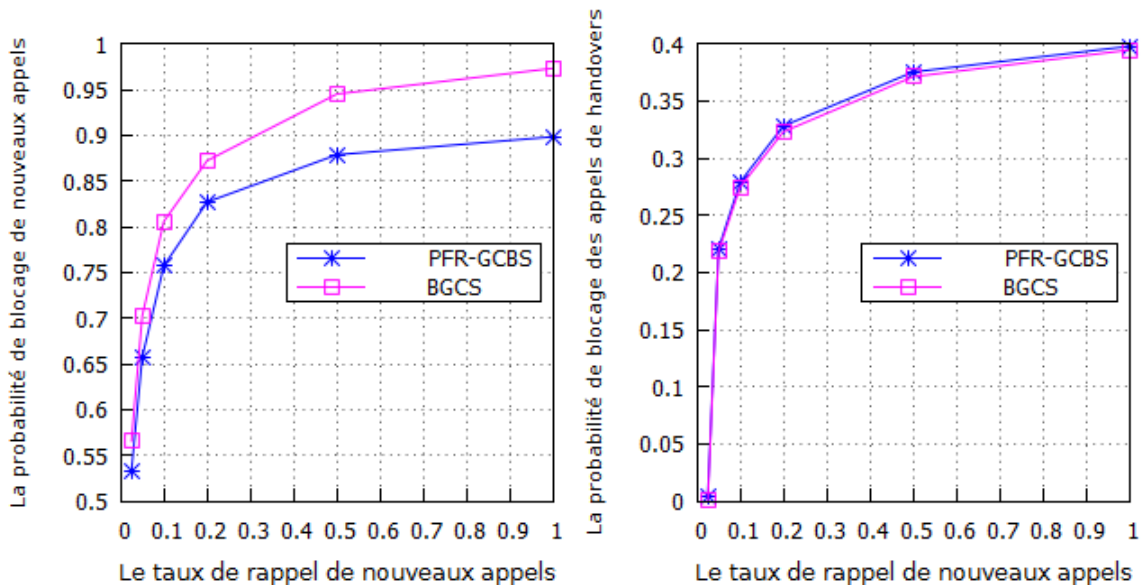


FIGURE 5.11 – La probabilité de blocage des appels en fonction du taux de rappel des nouveaux appels.

Comme nous pouvons le constater, la probabilité de blocage des appels croît de manière significative avec la croissance du taux de rappel des nouveaux appels. Ainsi, la probabilité de blocage des nouveaux appels dans la nouvelle stratégie *PFR-GCBS* est plus faible que celle dans la stratégie *BGCS* et celle de blocage des appels de handovers est presque identique dans les deux stratégies de *CAC*. Cela, peut être interprété par l'effet du concept d'emprunt des canaux gardiens.

#### 5.3.2.4 La probabilité de blocage des appels en fonction du taux de rappel des appels de handovers

Dans la figure 5.12, nous illustrons l'effet que génère la variation du taux de rappel des appels de handovers sur la probabilité de blocage des nouveaux appels et celle de blocage des appels de handovers. Comme nous pouvons le constater, la probabilité de blocage des appels (nouveaux et handovers) croît de manière significative avec la croissance du taux d'arrivée de rappel des appels de handovers. Ainsi, la probabilité de blocage des nouveaux appels dans la nouvelle stratégie *PFR-GCBS* est plus faible que celle dans la stratégie *BGCS*. Cette influence est plus significative quand l'intensité d'arrivée est faible et elle est presque négligeable pour des taux d'arrivée plus importants. Cela, peut être justifié par l'effet du concept d'emprunt des canaux gardiens et la quantité du temps passée dans l'orbite de handover. Aussi, la probabilité de blocage des appels de handovers dans la stratégie *PFR-GCBS* est légèrement plus importante que celle dans la stratégie *BGCS* surtout pour des taux d'arrivée importants. Cela, peut être

### 5.3. Etude de cas de la nouvelle stratégie de CAC avec canaux gardiens empruntables et priorité de rappel (*PFR-GCBS*)

justifié par l'effet négatif du concept d'emprunt des canaux gardiens surtout lorsqu'il y a des arrivées intensives et les canaux gardiens sont empruntés par des appels de handovers.

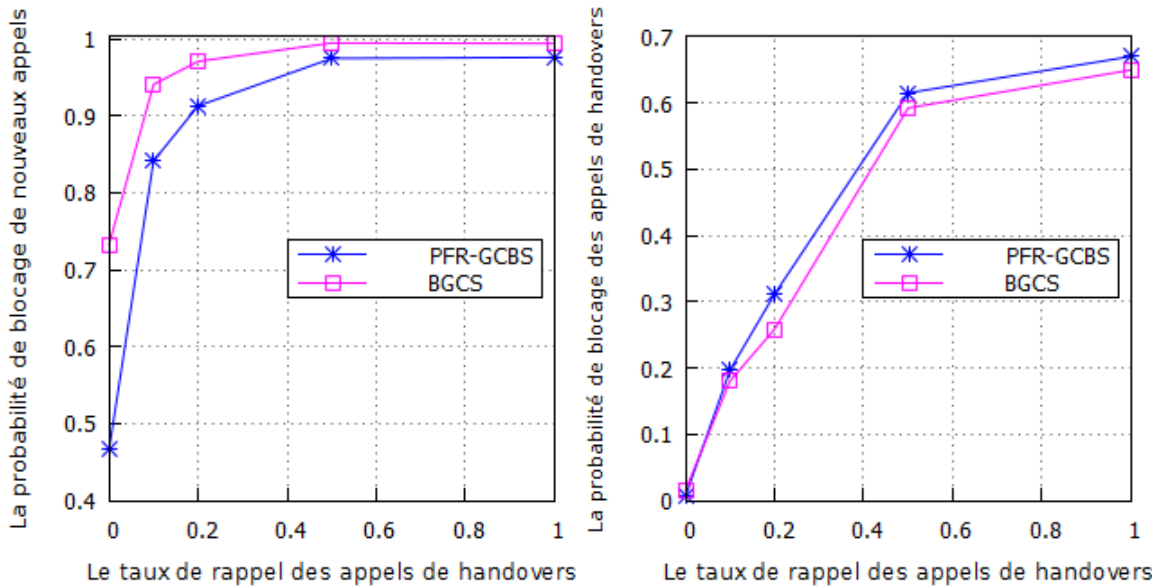


FIGURE 5.12 – La probabilité de blocage des appels en fonction du taux de rappel des appels de handovers.

#### 5.3.2.5 Le nombre moyen de canaux occupés en fonction du taux d'arrivée des appels

Dans la figure 5.13, nous illustrons l'effet que génère la variation du taux d'arrivée des nouveaux appels (resp. des appels de handovers) sur le nombre moyen de canaux occupés.

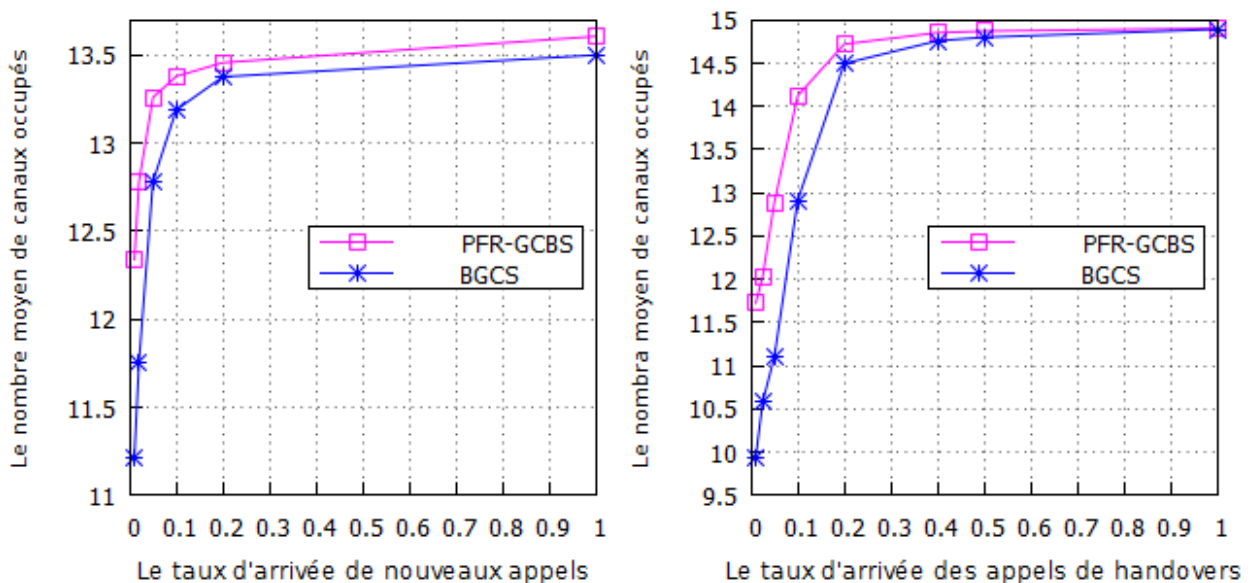


FIGURE 5.13 – Le nombre moyen de canaux occupés en fonction du taux d'arrivée des appels.

Nous remarquons que le nombre moyen de canaux occupés croît avec la croissance du taux d'arrivée des appels (que ce soit des nouveaux appels ou des appels de handovers) et il converge vers le nombre maximum de canaux dans le cas des arrivées intensives des appels de handovers,

### 5.3. Etude de cas de la nouvelle stratégie de CAC avec canaux gardiens empruntables et priorité de rappel (*PFR-GCBS*)

en revanche, il a une limite moins importante dans le cas des arrivées intensives des nouveaux appels. Cela est dû principalement au concept des canaux gardiens. Ainsi, le nombre moyen de canaux occupés dans la nouvelle stratégie *PFR-GCBS* est plus grand que celui dans la stratégie *BGCS* surtout dans le cas où il ya une forte intensité d'arrivée des nouveaux appels et une faible intensité d'arrivée des appels de handovers. Pour le cas de forte intensité d'arrivée des appels de handovers l'effet de la nouvelle stratégie *PFR-GCBS* est minimale.

#### 5.3.2.6 La probabilité de blocage des appels en fonction du nombre de canaux gardiens empruntables ( $t$ )

Dans la figure 5.14, nous illustrons l'effet que génère la variation du nombre de canaux gardiens empruntables ( $t$ ) sur la probabilité de blocage des nouveaux appels et celle de blocage des appels de handovers, cela pour différentes expériences dans le nombre de canaux gardiens ( $g$ ) est entre 1 et 5.

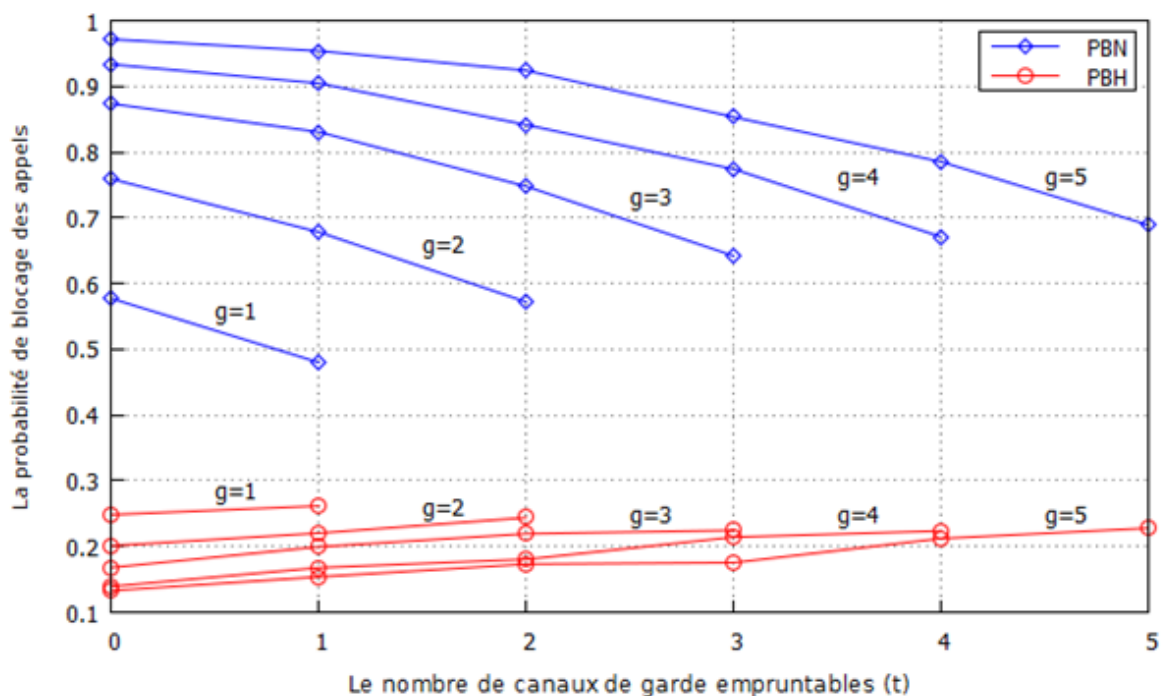


FIGURE 5.14 – La probabilité de blocage des appels en fonction du nombre de canaux gardiens empruntables ( $t$ ).

Comme nous pouvons le constater, la probabilité de blocage des appels est très sensible à la variation du nombre de canaux gardiens empruntables ( $t$ ). Ainsi, nous remarquons très clairement que la probabilité de blocage des nouveaux appels décroît de manière significative avec la croissance du nombre de canaux gardiens empruntables ( $t$ ), cependant, la probabilité de blocage des appels de handovers croît mais de manière relativement faible. Cela, peut être justifié par l'effet du nouveau concept d'emprunt des canaux gardiens. Aussi, nous remarquons que pour un seuil d'emprunt ( $t$ ) entre 50 et 60% parmi les canaux gardiens, la nouvelle stratégie *PFR-GCBS* permet d'améliorer significativement la probabilité de blocage des nouveaux appels sans trop affecter celle de blocage des appels de handovers.

## 5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude expérimentale détaillée des stratégies de *CAC* avec rappel et réservation des canaux gardiens dans les réseaux *SCNs*.

En effet, sur la base d'une série d'expérimentations et des résultats numériques exacts obtenus, nous pouvons confirmer l'assertion qui dit que l'utilisation de la technique des canaux gardiens avec de bons paramètres (le nombre de canaux gardiens par exemple) permet d'améliorer considérablement la probabilité de blocage des appels de handovers, mais en contre partie, augmente celle de blocage des nouveaux appels et diminue le nombre d'appels admis dans la cellule. D'autre part, le phénomène de rappel des abonnés de la cellule ou venant d'une cellule adjacente ne doit être dans aucun cas négligé vu l'important impact négatif que représente ce phénomène sur les performances du réseau. Aussi, les résultats ont montré que les cellules avec une petite population d'abonnés fournissent de meilleurs résultats concernant la probabilité de blocage des appels et améliorent la *QoS* du réseau par rapport aux cellules avec de grandes tailles de la population.

D'autre part, l'étude expérimentale et comparative de la nouvelle stratégie de *CAC* avec priorité de rappel et des canaux gardiens empruntables (*PFR-GCBS*), a démontré que cette dernière améliore la *QoS* du réseau et permet de diminuer la probabilité de blocage des nouveaux appels et d'augmenter le nombre moyen de canaux occupés qui représente le nombre moyen d'appels en cours de communication, ce qui permet d'augmenter l'utilisation de l'ensemble des canaux et d'utiliser les ressources disponibles d'une micro-cellule d'une manière plus efficace. Cela serait très bénéfique pour les opérateurs téléphoniques et peut augmenter leurs revenus et bénéfices. D'autre part, cette amélioration significative est moins efficace et peut causer une légère augmentation de la probabilité de blocage des appels de handovers dans certaines situations où il y a une forte intensité d'arrivée des appels de handovers. Autrement dit, la stratégie *PFR-GCBS* est beaucoup plus efficace dans les situations avec une faible mobilité des abonnés et elle est moins efficace dans le cas de situations à fortes mobilités des abonnés. Aussi, les résultats ont montré qu'en fixant le seuil d'emprunt ( $t$ ) entre 50 et 60% parmi les canaux gardiens, *PFR-GCBS* peut améliorer significativement les performances du réseau sans trop affecter la probabilité de blocage des appels de handovers.

## Conclusion Générale

Les réseaux mobiles cellulaires ont connu un développement sans précédent ces dernières années. Ces réseaux déploient de plus en plus des petites cellules (*small cells*) dans le but d'augmenter la capacité du système et améliorer sa couverture. Cependant, le déploiement des petites cellules expose la station mobile (ou l'abonné) à changer plusieurs cellules durant une même communication. Cette opération est appelée *handover*. Le maintien de la continuité de cette communication doit être assuré d'une façon transparente pour l'abonné par le réseau. D'autre part, la terminaison forcée de l'appel est un phénomène très gênant pour l'abonné. Ainsi, implanter des mécanismes de contrôle d'admission permettant de réduire la probabilité de coupure des communications devient très important. Par ailleurs, les réseaux mobiles cellulaires sont caractérisés par deux flux d'arrivées d'appels : les arrivées des nouveaux appels et les arrivées des appels de handovers, un troisième flux est souvent rajouté pour représenter les appels répétés générés par les abonnés bloqués, qu'ils soient initiés dans la cellule ou venant d'une cellule adjacente.

Dans ce mémoire nous nous sommes intéressés à l'étude des performances des stratégies de contrôle d'admission des appels (*CAC : Call Admission Control*) dans les réseaux mobiles micro-cellulaires ou les réseaux à petite cellules (*SCN : Small Cell wireless Network*) avec la prise en considération du phénomène des appels répétés. Au début, nous avons élaboré un état de l'art sur les différents modèles analytiques relatifs aux mécanismes de *CAC* dans les réseaux mobiles cellulaires qui visent la favorisation des appels de handovers via la technique des canaux gardiens et ses dérivées. Après, nous avons proposé deux contributions.

Dans la première contribution, nous avons proposé un modèle décrivant un mécanisme de *CAC* avec rappel des nouveaux appels bloqués et  $g$  canaux gardiens, à l'aide du formalisme des chaînes de Markov à temps continu (*CMTC*) puis à l'aide des *RDPSG* pour les réseaux *SCNs*, dont la taille de la population de la micro-cellule est considérée finie. Par la suite, et pour le calcul des probabilités d'états, nous avons adopté et proposé une généralisation d'un algorithme défini par *Tran-Gia* et *Mandjes* [1], à un nombre quelconque de canaux gardiens et une source finie. Les résultats numériques ont montré que l'utilisation de la technique des canaux gardiens avec de bons paramètres peut garantir une faible probabilité de blocage des appels de handovers. Cependant, cette uniformité, ne tient pas compte du trafic qui peut exister dans une cellule, et généralement engendre à la fois une augmentation de la probabilité de blocage des nouveaux appels et une perte du trafic offert. Résultat, d'autres mécanismes complémentaires doivent être ajoutés pour remédier à ce problème. Aussi, le phénomène des appels répétés a un important impact négatif sur les performances du réseau, c'est pourquoi il n'est pas question d'ignorer ce paramètre lors de l'étude des performances des réseaux mobiles cellulaires. D'autre part, les résultats ont montré que les petites tailles de la population des cellules donnent de meilleures performances que celles des cellules à population importante.

Dans la deuxième contribution, nous avons été motivés par les situations dans lesquelles des nouveaux appels sont bloqués (faute de l'indisponibilité de canaux ordinaires libres) tandis que des canaux gardiens réservés exclusivement pour les appels de handovers sont non occupés. Partant de ce constat et dans le but de maximiser l'utilisation des canaux, nous avons proposé une

nouvelle stratégie de CAC avec une *priorité* pour le rappel et des canaux gardiens *empruntables* intitulé *Priority for Fresh call Retrial based on Guard Channel Borrowing Scheme (PFR-GCBS)*, à l'aide des *RDPSG*. Cette nouvelle stratégie considère le rappel des nouveaux appels bloqués et celui des appels de handovers bloqués. La principale nouveauté apporté par *PFR-GCBS* c'est la priorité attribuée aux rappels des nouveaux appels bloqués via un nouveau concept dit *d'emprunt de canaux gardiens*. Ce concept autorise un nouvel appel bloqué qui rappelle à emprunter et occuper temporairement un canal gardien oisif.

Pour évaluer les performances de *PFR-GCBS*, nous avons procédé par la comparaison des performances de deux micro-cellules relatives à la stratégie *PFR-GCBS* et à la stratégie de *CAC* basique avec réservation des canaux gardiens et rappel des nouveaux appels et des appels de handovers. Comme prévu, la nouvelle stratégie *PFR-GCBS* améliore la *QoS* du système et utilise les ressources disponibles de la micro-cellule d'une manière plus efficace. Ainsi, les résultats ont montré que la priorité de rappel accordée aux rappels bloqués initiés dans la cellule, permet de diminuer la probabilité de blocage des nouveaux appels et augmente le nombre moyen des canaux occupés qui représente le nombre moyen des appels en cours de communications, ce qui augmente le taux d'utilisation des canaux et par conséquent augmente le bénéfice et le revenu des opérateurs téléphoniques. Cependant, *PFR-GCBS* présente une petite augmentation de la probabilité de blocage des appels de handovers dans certaines situations où il y a une forte densité d'arrivées des appels de handovers. En effet, les résultats ont aussi montré qu'en fixant le seuil d'emprunt  $t$  entre 50 et 60% parmi les canaux gardiens, *PFR-GCBS* peut améliorer les performances du système sans trop affecter la probabilité de blocage des appels de handovers.

Comme récapitulation, la stratégie *PFR-GCBS* semble très efficace et améliore significativement la *QoS* du réseau dans le cas d'abonnés à faible mobilité, et elle est moins efficace et son effet est moins remarquable dans le cas des réseaux à forte mobilité des abonnés. Donc, les opérateurs téléphoniques peuvent faire appel à la nouvelle stratégie *PFR-GCBS* dans certaines périodes de la journée comme pendant la nuit par exemple, lorsque la mobilité des abonnés est relativement faible.

Les *RDPSG* sont un moyen graphique et mathématique d'une grande puissance descriptive, qui permet de modéliser par des modèles simples qui incluent différents événements (source finie, deux flux d'arrivées, service parallèle, deux types de rappels, canaux gardiens et mécanisme de *CAC*). Ils permettent de plus, de faire l'analyse qualitative et quantitative (i.e. l'évaluation des performances) de ces systèmes.

En fin, comme perspectives à notre travail, il serait intéressant que le seuil d'emprunt  $t$  soit adapté d'une manière dynamique en fonction de la vitesse d'arrivée des appels de handovers. Comme il serait très intéressant d'appliquer la stratégie *PFR-GCBS* aux réseaux cellulaires de la nouvelle génération à classe de services multiples (voix, données et vidéos) en définissant un certain ordre de priorité entre les différents classes de service.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Tran-Gia and M. Mandjes. Modeling of customer retrial phenomenon in cellular mobile networks. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 15 :1406–1414, 1997.
- [2] N. Badache and T. Lemlouma. Le routage dans les réseaux mobiles ad hoc. Master's thesis, Université des sciences et de la technologie Houari Boumedienne (USTHB), Algerie, September 2000.
- [3] Y. Zafoune. *Étude de l'impact de la Technologie d'agent mobile dans la gestion des réseaux mobiles Ad hoc*. PhD thesis, Université des sciences et de la technologie Houari Boumedienne (USTHB), Algerie, 2010.
- [4] F. Mekhaldi. *Partitionnement dans les réseaux mobiles Ad-hoc : conception et évaluation de protocoles auto-stabilisants robustes*. PhD thesis, Université de Paris-Sud 11, France, December 2011.
- [5] S.M. Senouci. *Application de techniques d'apprentissage dans les réseaux mobiles*. PhD thesis, Université de Pierre et Marie Curie – Paris 6, France, 2003.
- [6] G. Pujolle. *Les réseaux 6ième édition*. Editions Eyrolles, Paris, 2008.
- [7] I. Daya. Planification radio d'une solution découverte indoor gsm. Master's thesis, Ecole supérieur de communication de Tunis, Tunis, 2005.
- [8] C. Mezioud. *Recherche sur la résolution des problèmes complexes d'affectation de fréquences basses bandes pour les opérateurs de la téléphonie mobile*. PhD thesis, Université Mentouri de Constantine, Algerie, 2011.
- [9] F. Lemainque. *Tous sur les réseaux sans fil*. Editions Dunod, Paris, 2005.
- [10] A. Calvagna and G. Di Modica. A user-centric analysis of vertical handovers. In *the Second ACM International Workshop on Wireless Mobile Applications and Services on WLAN Hotspots (WMASH)*, pages 137–146. 2004.
- [11] L. Issaoui. Développement d'un outil de planification et d'optimisation de fréquences dans un réseau gsm. Master's thesis, Ecole supérieure des communications de Tunis (SUP'COM), Tunis, 2006.
- [12] I. Roula. *Application des techniques d'apprentissage à la géolocalisation par radio finger print*. PhD thesis, Université de Pierre ET Marie Curie, France, 2009.
- [13] C. Demoulin and M. Van Droogenbroeck. Principes de base du fonctionnement du réseau gsm. *Revue de l'AIM*, 4 :3–18, 2004.
- [14] M. Garah. *Minimisation de la probabilité d'échec du handover dans les réseaux cellulaires mobiles*. PhD thesis, Université de Elhadj Lakhder – Batna, Algerie, 2009.

- [15] S. Girodon. Réseaux gsm, gprs et umts : Architecture évolutive pour une stratégie de services. Technical report, DESS MTI-IAE Aix en Provence, 2002.
- [16] E. Tonye and L. Ewoussoua. Planification et ingénierie des réseaux de télécoms : architecture gsm, gprs et umts. Master's thesis, Université de Yaounde I (école nationale supérieure polytechnique), Cameroun, 2007.
- [17] P. Lescuyer. *UMTS : les origines, l'architecture, la norme*. Editions Dunod, Paris, 2001.
- [18] B. Savouré. La téléphonie mobile : technologies, acteurs et usages. Master's thesis, Université d'AIX-Marseille, France, 2006.
- [19] N. Nasri. *Étude, simulation et caractérisation électronique et protocolaire de modules RFID dédiés à une communication en milieu aquatique*. PhD thesis, Université de Toulouse II, France, 2010.
- [20] L. Yiqun. *Contribution à l'optimisation des performances d'antennes de téléphones mobiles à l'aide de techniques d'adaptation*. PhD thesis, Université de Cergy-Pontoise, France, 2009.
- [21] H. J. Wang, R. k. Katz, and J. Giese. Policy-enabled handoffs across heterogeneous wireless networks. In *Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA)*, page 51–60, 1999.
- [22] K. Ibrahim. *Gestion des ressources des réseaux mobiles de nouvelle génération par rapport à la mobilité des utilisateurs*. PhD thesis, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse France et Université Mohammed V-Agdal Rabat-Maroc, Maroc, 2009.
- [23] S. Javier and T. Mamadou. *UMTS (réseaux et télécommunications, 2ème édition)*. Editions Hermès - Science, Paris, 2004.
- [24] J. Hoydis, M. Kobayashi, and M. Debbah. Random matrix theory for small cell networks. In *Proceedings of The 25th Meeting of Wireless World Research Forum (WWRWF25-WG4-01)*, 2010.
- [25] N. Gharbi. Modeling and performance evaluation of small cell wireless networks with base station channels breakdowns. In *Proceedings of the Eighth International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC)*, 2012.
- [26] V. Kavitha, S. Ramanath, and E. Altman. Analysis of small cells with randomly wandering users. In *Proceedings of the International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WIOPT 2012)*, pages 60–67, Paderborn, Germany, May 14-18 2012.
- [27] P. T. Hoa and T. Yamada. Performance boost with pico-cells in a unified micro-cellular network. In *Proceedings of the Second International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'06)*, Bucharest, Romania, July 29-31 2006.
- [28] X. Lagrange, P. Godlewski, and S. Tabbane. *Réseaux GSM-DCS*. Editions Hermès Science, Paris, 1995.
- [29] L. Chamek. Localisation des mobiles par une stratégie de prédiction. Master's thesis, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, Algérie, 2011.
- [30] V. Quang Bien, R. Venkatesha Prasad, and I. G. Niemegeers. A survey on handoffs - lessons for 60ghz based wireless systems. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 14(1) :64–86, 2012.
- [31] T. Bchini. *Gestion de la mobilité, de la qualité de service et interconnexion de réseaux mobiles de nouvelle génération*. PhD thesis, Université de Toulouse, France, 2010.

- [32] H. Chen, S. Kumar, and C.-C. J. Kuo. Dynamic call admission control scheme for qos priority handoff in multimedia cellular systems. In *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record (WCNC)*, volume 1, pages 114–118, Orlando, Florida, USA, March 17-21 2002.
- [33] A. Djennane. La gestion de la mobilité dans les réseaux wimax802.16. Master’s thesis, Université Elhadj Lakhder – Batna, Algeria, 2011.
- [34] B. Jabbari, G. Colombo, A. Nakajima, and J.Kulkarni. Network issues for wireless communications. *Communications Magazine, IEEE*, 33(1) :88–99, January 1995.
- [35] M. M. Islam and M. Murshed. Novel velocity and call duration support for qos provision in mobile wireless networks. *Wireless Communications, IEEE*, 11(5) :22–30, October 2004.
- [36] S. Alagu and T.Meyyappan. An efficient call admission control scheme for handling handoffs in wireless mobile networks. *International Journal on AdHoc Networking Systems (IJANS)*, 2(3), July 2012.
- [37] R. Makke. *Qualité de Service et performances des protocoles de transport dans l’UTRAN*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications-Paris, France, 2003.
- [38] C.A. Petri. *Kommunikation mit Automaten*. PhD thesis, Institut für Instrumentelle Mathematik, Bonn, 1962.
- [39] T. Murata. Petri nets : properties, analysis, and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4) :541–580, April 1989.
- [40] C. Ramchandani. *Analysis of asynchronous concurrent systems by timed Petri nets*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, project Mac report MAC-TR-120, 1974.
- [41] M. K. Molloy. Performance analysis using stochastic petri nets. *IEEE Transactions on computers*, C-31(9) :913–917, September 1982.
- [42] M. Ajmone Marsan, G. Bablo, and G.Conte. A class of generalized stochastic petri nets for performance analysis of multiprocessor systems. *ACM Transactions on computer systems*, 2(1) :93–122, May 1984.
- [43] M. Ajmone Marsan and V. Signor. Timed petri nets performance models for fiber optic lan architectures. In *Proceedings of the 2nd international workshop on Petri nets and performance Models (PNPM87)*, pages 66–74, Madison, Wisconsin, USA, August 24-26 1987.
- [44] G. W. Brams, C. Andre, G. Berthelot, C. Girault, G. Memmi, G. Roucairol, J. Sifakis, R. Valette, and G. Vidal-Naquet. *Reseaux de Petri : Théorie et Pratique. Tome 1 : Théorie et Analyse, Tome 2 : Modélisation et Applications*. Editions Masson, Paris, 1982.
- [45] G.W Bransms. *Réseaux de Petri : Théorie et analyse*. Editions Masson, Paris, 1983.
- [46] M. Diaz. *Les réseaux de Petri-Modèles fondamentaux*. Editions Hermès Science, Paris, 2001.
- [47] R. David and H. Alla. *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2010.
- [48] G. Vidal-Naquet and A. Choquet-Geniet. *Réseaux de Petri et systèmes parallèles*. Editions Armand Colin, Paris, 1992.
- [49] M. Bourcerie. *Réseaux de Petri, élaboration pour les systèmes de production*. Editions Technosup Ellipses, Paris, Février 2011.

- [50] N. Gharbi. *Evaluation des performances et de la fiabilité des systèmes multi-classes avec rappel à l'aide des réseaux de Petri stochastiques colorés*. PhD thesis, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediène (USTHB), Algerie, 2007.
- [51] P. Bonhomme. *Réseaux de Petri P-Temporels : Contributions à la Commande robuste*. PhD thesis, Université de Savoie, France, 2001.
- [52] M. Zouaoui. *Définition d'un langage de type logique temporelle pour la spécification et l'évaluation des performances*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, France, 1998.
- [53] A. M'Halia. *Contribution à la gestion des perturbations dans les systèmes manufacturiers à contraintes de Temps*. PhD thesis, Université de Tunis El Manar, école nationale d'ingénieurs de Tunis, Tunis, 2010.
- [54] E. Teruel, J. M. Colom, and M. Silva. Choice-free petri nets : a model for deterministic concurrent systems with bulk services and arrivals. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans*, 27 :73–83, January 1997.
- [55] G.W Branms. *Réseaux de Petri : Théorie et analyse*. Editions Masson, Paris, 1983.
- [56] J.M Proth and X. Xie. *Les réseaux de Petri pour la conception et la gestion des systèmes de production*. Editions Masson, Paris, 1995.
- [57] G. yadav and A. K. Bajpai. Overview of modelling of production (fms/cim) system using petri nets. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, 1(8), October 2012.
- [58] B. Baynat. *Théorie des files d'attente - des chaînes de Markov aux réseaux à forme produit*. Editions Hermès Science, Paris, 2000.
- [59] M. Ajmone Marsan. Stochastic petri nets : An elementary introduction. Technical report, Université de Milan, Italie, 1990.
- [60] M. Sakarovitch. *Techniques mathématiques de la recherche opérationnelle, Tome V : processus aléatoires*. Ensimag, France, 1985.
- [61] A. Zenie. *Les RDPs colorés : applications à l'analyse des systèmes répartis en temps réel*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, Octobre 1987.
- [62] C. Dutheillet Lamonthesie. *Symétrie dans les réseaux de Petri coloré, définitions, analyse et application à l'évaluation des performances*. PhD thesis, Université de Paris VI, France, Mars 1992.
- [63] W. J. Stewart. *Introduction to the numerical solution of Markov Chains*. Princeton University Press, USA, 1994.
- [64] G. Florin and S. Natkin. Evaluation des performances d'un protocole de communication à l'aide des réseaux de petri et des processus stochastiques. In *Journées AFCET Informatique : multiprocesseurs et Multi ordinateurs en temps Réel, CNRS*, pages E1–E24, Paris, France, May 1978.
- [65] G. Florin, C. Fraize, and S. Natkin. Stochastic petri nets : Properties, applications and tools. *Microelectronics and Reliability*, 31(4) :669–697, January 1991.
- [66] G. Florin and S. Natkin. Les réseaux de petri stochastique. *TSI*, 4(1), February 1985.
- [67] M. Ajmone Marsan, G. Bablo, G.Conte, S. Donatelli, and G. Franceschinis. Modeling with generalized stochastic petri nets. *John Wiley Series in Parallel Computing*, 1995.
- [68] G. Bablo. Introduction to generalized stochastic petri nets. In *Proceedings of the 7th international conference on Formal methods for performance evaluation*, pages 83–131, Bertinoro, Italy, 2007.

- [69] A. Bobbio, A. Puliafio, M. Telek, and K.S. Trivedi. Recent developments in stochastic petri nets. *journal of systems and computers, special issue on selective topics in Petri nets*, 8(1) :119–158, February 1998.
- [70] M. H. Ahmed. Call admission control in wireless networks : a comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 7(1), 2005.
- [71] N. Rola. *Gestion de la mobilité et allocation de ressources dans les réseaux multiservices sans fil*. PhD thesis, Ecole nationale supérieure de télécommunications, France, 2003.
- [72] N. Ekiz, T. Salih, S. Kucukoner, and K. Fidanboyllu. An overview of handoff techniques in cellular networks. *International Journal Of Information Technology*, 2(2), 2005.
- [73] D. Hong and S. Rappaport. Traffic modeling and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and onprioritized handoffs procedure. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 35(3) :77–92, August 1986.
- [74] L. Wang, G. Min, D. D. Kouvatsos, and X. Zuo. In *Network Performance Engineering*, chapter Modelling and Analysis of a Dynamic Guard Channel Handover Scheme with Heterogeneous Call Arrival Processes, pages 665–681. pubSpringer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [75] B. Hwang, I-S. Hwang, and C. Shen. Performance evaluation of multi-guard channel schemes. In *Proceedings of the international conference on mobile technology, applications and systems (Mobility Conference)*, number 19, pages 1–7, Yilan, Taiwan, 2008.
- [76] D. Fedyanin and D. Sarkar. Iterative algorithms for performance evaluation of wireless networks with guard channels. *International Journal of Wireless Information Networks*, 8(4) :239–245, 2001.
- [77] M. Zhang and T.S. Yum. The nonuniform compact pattern allocation algorithm for cellular mobile systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 40(2) :387–391, May 1991.
- [78] C. J. Chang, T. T. Su, and Y. Y. Chiang. Analysis of a cutoff priority cellular radio system with finite queueing and reneging/dropping. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2(2) :166–175, April 1994.
- [79] R. Ramjee, D. Towsley, and R. Nagarajan. On optimal call admission control in cellular networks. In *Proceedings IEEE INFOCOM '96. Fifteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer Societies. Networking the Next Generation*, volume 1, pages 43–50, March 1996.
- [80] J. L. Vázquez-Avila, F. A. Cruz-Pérez, and L. Ortigoza-Guerrero. Performance analysis of fractional guard channel policies in mobile cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(2) :301–305, February 2006.
- [81] T. C. Wong, J. W. Mark, and K. C. Chua. Multi-level dynamic guard channels for priority access in cellular systems. In *Proceedings of the 4th IFIP-TC6 international conference on Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communication Systems (NETWORKING'05)*, volume 3462 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 598–609. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [82] K. Parwani and G.N.Purohit. Allocation of guard channels for qos in hierarchical cellular network. In *Advances in Computer Science, Engineering and Applications*, volume 167 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pages 569–577. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [83] H. Beigy and M. R. Meybodi. A two-threshold guard channel scheme for minimizing blocking probability in communication. *Networks IJE Transactions B : Applications*, 17(3), 2004.

- [84] H. Beigy and M.R. Meybodi. A general call admission policy for next generation wireless networks. *Computer Communications*, 28(16) :1798–1813, 2005.
- [85] N. Nasser and H. S. Hassanein. Optimal multi-class guard channel admission policy under hard handoff constraints. In *Proceedings of the 3rd ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications*, January 3-6 2005.
- [86] A. K. Mukhopadhyay, S. Saha, S. Ghose, D. Saha, and D. Nagamalai. An analytical model of multi-service call admission control in next generation wireless overlay networks. In *Proceedings of the First International Conference on Networks and Communications (NETCOM)*, IEEE Computer Society, pages 98–103, December 2009.
- [87] H. H. Liu and Y. T. Guo. Guard channel allocation in integrated voice/data mobile networks with guard channel sharing scheme. In *Proceedings of the 2006 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, IWCMC '06*, pages 749–754, Vancouver, British Columbia, Canada, July 3-6 2006.
- [88] S.F. Yang, J.S. Wu, and B.J. Hwang. Performance evaluation of priority based adaptive multiguard channel call admission control for multiclass services in mobile networks. *International Journal of Communication Systems*, 26(5) :597–609, 2013.
- [89] S. R. Somagari and H. K. Pati. An analytical model for adaptive multi-guard channel scheme for multi-class traffic in cellular networks with reduced handoff drop probabilities. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Communication, Computing and Security (ICCCS-2012)*, volume 6, page 690–697, 2012.
- [90] T. V. Do. An efficient computation algorithm for a multi server feedback retrial queue with a large queueing capacity. *Applied Mathematical Modelling*, 34(8) :2272 – 2278, 2010.
- [91] G. P. Basharin and V. E. Merkulov. Blocking probability analysis of new and handover calls in cellular mobile networks with repeated attempts. In *Proceedings of the 7th International Conference on Telecommunications (ConTEL 2003)*, volume 1, pages 273–278, 2003.
- [92] A. Economou and M.J. Lopez-Herrero. Performance analysis of a cellular mobile network with retrials and guard channels using waiting and first passage time measures. *European Transactions on Telecommunications*, 20(4) :389–401, June 2009.
- [93] B. D. Choi, Y. Chang, and B. Kim. Map1, map2/m/c retrial queue with guard channels and its application to cellular networks. *Journal on Operations Research of the Spanish Society of Statistics and Operational Research*, 7(2) :231–248, 1999.
- [94] M. Ajmone Marsan, G. De Carolis, E. Leonardi, R. Lo Cigno, and M. Meo. Efficient estimation of call blocking probabilities in cellular mobile telephony networks with customer retrials. *IEE Journal on Selected Areas in Communication*, 19(2) :332–346, February 2001.
- [95] J.M. Gimenez-Guzman, M.J. Domenech-Benlloch, J. Martinez-Bauset, V. Pla, and V. Casares-Giner. Analysis of a handover procedure with queueing, retrials and impatient customers. pages 1–10, Ilkley, West Yorkshire, United Kingdom, July 2005.
- [96] Z. Zhou and Y. Zhu. Optimization of the (map1, map2)/ (ph1, ph2)/n retrial queue model of wireless cellular networks with channel allocation. *Systems Engineering and Electronics*, 22(5) :739–748, 2011.
- [97] J. Roszik, J. Anos Sztrik, and Che-Soong Kim. Retrial queues in the performance modeling of cellular mobile networks using mosel. *International Journal of Simulation : Systems, Science and technology*, 6 :38–47, 2005.
- [98] J.R. Artalejo and M.J. Lopez-Herrero. Cellular mobile networks with repeated calls operating in random environment. *Computers and Operations Research*, 37(7) :1158–1166, 2010.

- [99] T. V. Do. Solution for a retrial queueing problem in cellular networks with the fractional guard channel policy. *Mathematical and Computer Modelling*, 53(11) :2059–2066, June 2011.
- [100] J. M. Gimenez-Gusman, M. J. Domenech-Ben, J. Martinaz-Bauset, V. T. Pla, and V. Casares-Giner. Analysis of a cellular network with user redials and automatic handover retrials. In *Proceedings of the 7th international conference of the next generation tele-traffic and wired/wireless advanced networking, lecture notes in computer science*, volume 4712, pages 210–222. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [101] S. Dharmaraja, V. Jindal, and AS. Alfab. Phase-type models for cellular networks supporting voice, video and data traffic. *Mathematical and Computer Modelling*, 47(11) :1167–1180, 2008.
- [102] M. Mandjes and K. Tutschku. Efficient call handling procedures in cellular mobile networks. *Forschungsbericht, Preprint-Reihe 144, Institut fur Informatik, Universit at Wurzburg, Germany*, 1996.
- [103] N. Gharbi and C. Dutheillet. An algorithmic approach for analysis of finite-source retrial systems with unreliable servers. *Computers and Mathematics with Applications*, 62(6) :2535–2546, 2011.
- [104] N. Gharbi. A numerical approach for performance evaluation of cellular mobile networks with channels breakdowns. In *Proceedings of the Twelfth International Conference on Networks (ICN)*, pages 190–196. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [105] C. Molina, D. MuAoz, and E. L6pez. Modeling and analysis of telecommunication cellular systems using petri nets. In *Proceedings of the IEEE Systems, Man and Cybernetics Conference*, pages 2322–2327, San Antonio, Tx, October 2-5 1994.
- [106] C. Molina, D. MuAoz, and E. L6pez. Modeling and analysis of telecommunication cellular systems using petri nets. In *Proceedings of the IEEE 45th Vehicular Technology Conference*, volume 2, pages 876–881, Chicago, IL, July 25-28 1995.
- [107] F. J. Jaimes-Romero, D. Munoz-Rodriguez, C. Molina, and H. Tawfik. Modeling resource management in cellular systems using petri nets. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 46(2) :298–312, 1997.
- [108] E. Lopez-Mellado and C. Molina-Rarnirez. High level modeling of handoff and channel allocation algorithms for telecommunications mobile systems. *IEEE*, 1995.
- [109] X. Ma, Y. Liu, and K. S. Trivedi. Performability analysis of channel allocation with channel recovery strategy in cellular networks. In *Proceedings of the IEEE 1998 International Conference on Universal Personal Communications ICUPC'98*, volume 1, pages 71–75. IEEE, 1998.
- [110] Y. Ma, C. W. Rotand, and K. S. Trivedi. A new handoff scheme for decreasing both dropped calls and blocked calls in cdma system. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Trends in Communications (EUROCON'2001)*, volume 1, pages 115–119. IEEE, July 2001.
- [111] Y. K. MA, Y. H. LU, and S. Y. YANG. Petri net model of admission control in ofdma system. *Journal of System Simulation*, 23(12) :7675–7677, 2009.
- [112] N. Gharbi and L. Charabi. An algorithmic approach for analyzing wireless networks with retrials and heterogeneous servers. In *Proceedings of the ICWMC 2011, The Seventh International Conference on Wireless and Mobile Communications*, pages 151–156, June 2011.

- [113] N. Gharbi and L. Charabi. Wireless networks with retrials and heterogeneous servers : comparing random server and fastest free server disciplines. *International Journal On Advances in Networks and Services*, 5(1-2) :102–115, 2012.
- [114] N. Gharbi. A numerical approach for performance evaluation of cellular mobile networks with channels breakdowns. In *Proceedings of the ICN 2013 : The Twelfth International Conference on Networks*, pages 190–196, 2013.
- [115] C. Ziegler. *Suret  de fonctionnement d’architecteurs informatiques embarqu es sur automobile*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 1995.
- [116] N. Gharbi. *Support de cours MEPS, Master RSD, USTHB, 2013*.
- [117] G. Chiola, C. Franceschinis, R. Gaeta, and M. Ribaud. Greatspn 1.7 : Graohical editor and analyzer for timed and stochastic petri nets. *Performance evaluation*, 24(1-2) :47–68, 1995.