

## TABLE DES MATIÈRES

|                                                                                       | Page |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| INTRODUCTION .....                                                                    | 1    |
| CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE ET TRAVAUX RÉLIÉS .....                         | 7    |
| 1.1 Introduction.....                                                                 | 7    |
| 1.2 Motivation.....                                                                   | 7    |
| 1.3 Travaux précédents .....                                                          | 8    |
| 1.4 Contribution de recherche.....                                                    | 11   |
| 1.5 Publications et soumissions .....                                                 | 12   |
| 1.6 Résumé du chapitre.....                                                           | 13   |
| CHAPITRE 2 MODÈLE ÉCONOMIQUE DE LA SÉLECTION DES NŒUDS D'ACCÈS .....                  | 15   |
| 2.1 Introduction.....                                                                 | 15   |
| 2.2 Hypothèses.....                                                                   | 15   |
| 2.3 Statistiques sur les métriques de QoS et les comportements des utilisateurs ..... | 16   |
| 2.4 Décision multicritère basée sur les utilités.....                                 | 17   |
| 2.5 Agrégation des utilités des critères .....                                        | 17   |
| 2.5.1 Agrégation additive.....                                                        | 18   |
| 2.5.2 Agrégation multiplicative .....                                                 | 18   |
| 2.6 Résumé du chapitre.....                                                           | 18   |
| CHAPITRE 3 SÉLECTION DE NŒUD D'ACCÈS BASÉ SUR LES UTILITÉS<br>SÉPARÉES .....          | 19   |
| 3.1 Introduction.....                                                                 | 19   |
| 3.2 Algorithme du modèle de sélection .....                                           | 19   |
| 3.3 Calcul de l'utilité de l'utilisateur .....                                        | 21   |
| 3.4 Calcul de l'utilité de l'opérateur .....                                          | 23   |
| 3.4.1 Concept de prix caché et gain net .....                                         | 23   |
| 3.4.2 Calcul du gain net et du prix caché dans MDP décomposé.....                     | 27   |
| 3.5 Résumé du chapitre.....                                                           | 29   |
| CHAPITRE 4 SÉLECTION DE NŒUD D'ACCÈS BASÉ SUR MDP AVEC PENALITÉ .....                 | 31   |
| 4.1 Introduction.....                                                                 | 31   |
| 4.2 Itération de la politique avec ajout de pénalité d'utilité.....                   | 31   |
| 4.3 Calcul de la pénalité de l'utilité .....                                          | 34   |
| 4.4 Comparaison des deux modèles.....                                                 | 36   |
| 4.5 Résumé du chapitre.....                                                           | 36   |
| CHAPITRE 5 SÉLECTION POUR LE MULTICHEMIN .....                                        | 37   |
| 5.1 Introduction.....                                                                 | 37   |
| 5.2 Les nœuds d'accès à utiliser .....                                                | 37   |
| 5.3 Adaptation du paramètre de récompense de l'opérateur.....                         | 37   |
| 5.4 Résumé du chapitre.....                                                           | 39   |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CHAPITRE 6 PROTOCOLE MULTICHEMIN .....                                                 | 41 |
| 6.1 Introduction.....                                                                  | 41 |
| 6.2 Principes et fonctionnement.....                                                   | 41 |
| 6.3 Implémentation du protocole .....                                                  | 43 |
| 6.4 Répartiteur des flux aux sous-sessions .....                                       | 44 |
| 6.4.1 Algorithme de sélection de sous-sessions.....                                    | 45 |
| 6.4.2 Objectif « améliorer le débit » .....                                            | 46 |
| 6.4.3 Objectif « ne pas nuire » .....                                                  | 47 |
| 6.5 Déclenchement du multichemin .....                                                 | 49 |
| 6.6 Résumé du chapitre.....                                                            | 51 |
| CHAPITRE 7 ÉVALUATION DE PERFORMANCE .....                                             | 53 |
| 7.1 Introduction.....                                                                  | 53 |
| 7.2 Topologie et scénarios pour la sélection des nœuds d'accès .....                   | 53 |
| 7.3 Sélection des nœuds d'accès basée sur RSS .....                                    | 55 |
| 7.4 Paramètres pour la sélection des nœuds d'accès avec UFMDP et IUMDP.....            | 56 |
| 7.4.1 Évaluation de l'utilité de l'utilisateur .....                                   | 57 |
| 7.4.2 Évaluation de l'utilité de l'opérateur .....                                     | 59 |
| 7.5 Topologie et scénarios pour le test du répartiteur des flux aux sous-sessions..... | 60 |
| 7.6 Résultats numériques, analyses et discussion .....                                 | 62 |
| 7.6.1 Revenus de l'opérateur .....                                                     | 62 |
| 7.6.2 Débits de réception pour les utilisateurs .....                                  | 65 |
| 7.6.3 Délais de bout en bout sur les données des utilisateurs .....                    | 70 |
| 7.6.4 Probabilités de blocage des utilisateurs .....                                   | 71 |
| 7.6.5 Répartiteur proposé : variation des débits utilisateurs .....                    | 79 |
| 7.7 Résumé du chapitre.....                                                            | 81 |
| CONCLUSION .....                                                                       | 83 |
| RECOMMANDATIONS .....                                                                  | 85 |
| ANNEXE I PRINCIPES ET FONCTIONNEMENTS DE MPTCP .....                                   | 87 |
| ANNEXE II OPTIMISATION PAR ESSAIM DE PARTICULES (PSO) .....                            | 93 |
| LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....                                              | 97 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                   | Page |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tableau 6.1 Options MPTCP implémentées.....                                                       | 43   |
| Tableau 7.1 Paramètres de transfert des données .....                                             | 54   |
| Tableau 7.2 Valeurs demandées par les utilisateurs pour les critères.....                         | 58   |
| Tableau 7.3 Valeurs offertes par les nœuds d'accès pour les critères .....                        | 58   |
| Tableau 7.4 Valeurs des constantes pour le calcul de la pénalité d'utilité de l'utilisateur ..... | 59   |
| Tableau 7.5 Paramètres de trafic des nœuds d'accès.....                                           | 60   |
| Tableau 7.6 Paramètres de simulation pour tester le répartiteur.....                              | 61   |
| Tableau 7.7 Comparaison par paires des revenus de l'opérateur .....                               | 65   |
| Tableau 7.8 Comparaison par paires des débits moyens des utilisateurs .....                       | 67   |
| Tableau 7.9 Comparaison par paires des délais moyens des utilisateurs.....                        | 71   |



## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                                          | Page |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figure 0.1 Exemple de réseau sans fil hétérogène .....                                                                                                                                   | 2    |
| Figure 3.1 Modèle UFMDP de la sélection des nœuds d'accès .....                                                                                                                          | 20   |
| Figure 3.2 Fonction sigmoïdale pour le calcul de l'utilité de l'utilisateur .....                                                                                                        | 22   |
| Figure 3.3 Illustration du concept de prix caché .....                                                                                                                                   | 24   |
| Figure 3.4 Transitions d'état pour un nœud de capacité 4 et 2 classes d'utilisateurs .....                                                                                               | 26   |
| Figure 4.1 Variation de la pénalité en fonction de l'utilité de l'utilisateur .....                                                                                                      | 35   |
| Figure 6.1 Vue schématique de l'implémentation du MPTCP .....                                                                                                                            | 42   |
| Figure 6.2 Exemple d'entête TCP avec l'option MPTCP et sous -type MP_JOIN .....                                                                                                          | 42   |
| Figure 6.3 Répartiteur basé sur « améliorer le débit » et « ne pas nuire » .....                                                                                                         | 46   |
| Figure 6.4 Répartiteur de flux modélisé comme un système de files d'attente .....                                                                                                        | 48   |
| Figure 6.5 Étapes pour l'automatisation du déclenchement du multichemin .....                                                                                                            | 51   |
| Figure 7.1 Vue schématique de la topologie pour la sélection des nœuds d'accès .....                                                                                                     | 54   |
| Figure 7.2 Topologie du réseau pour le test du répartiteur .....                                                                                                                         | 61   |
| Figure 7.3 Revenus de l'opérateur en fonction de la charge du réseau .....                                                                                                               | 63   |
| Figure 7.4 Comparaison des revenus de l'opérateur pour IUMDP et UFMDP .....                                                                                                              | 64   |
| Figure 7.5 Débits moyens des utilisateurs en fonction de la charge du réseau .....                                                                                                       | 66   |
| Figure 7.6 Distribution des débits utilisateurs pour certaines charges du réseau .....                                                                                                   | 68   |
| Figure 7.7 Influence des poids des utilités pour UFMDP: a) variation des revenus en<br>fonction du poids de l'utilité b) variation des débits en fonction du<br>poids de l'utilité ..... | 69   |
| Figure 7.8 Délais moyens des utilisateurs en fonction de la charge du réseau .....                                                                                                       | 70   |
| Figure 7.9 Probabilités de blocage des utilisateurs en fonction de la charge du réseau .....                                                                                             | 72   |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 7.10 Probabilités de blocage par classe d'utilisateur en fonction de la charge du réseau: a) pour transfert avec chemin unique<br>b) pour transfert avec multichemin .....                                                                                                                               | 73 |
| Figure 7.11 Variation des probabilités de blocage des classes d'utilisateurs en fonction du rapport entre les paramètres de récompense avec UFMDP .....                                                                                                                                                         | 74 |
| Figure 7.12 Variation des probabilités de blocage des classes d'utilisateurs en fonction du rapport entre les paramètres de récompense avec IUMDP .....                                                                                                                                                         | 75 |
| Figure 7.13 a) Connexions acceptées en fonction du rapport des paramètres de récompense avec UFMDP<br>b) Revenus provenant des nœuds en fonction du rapport des paramètres de récompense avec UFMDP .....                                                                                                       | 77 |
| Figure 7.14 a) Connexions acceptées en fonction du rapport des paramètres de récompense avec IUMDP<br>b) Revenus provenant des nœuds en fonction du rapport des paramètres de récompense avec IUMDP .....                                                                                                       | 78 |
| Figure 7.15 Variation des débits utilisateurs pour différents répartiteurs: a) Lowest-RTT-First<br>b) répartiteur proposé, poids utilité « améliorer débit » et « ne pas nuire » = 0.5<br>chacun c)<br>répartiteur proposé, poids utilité « améliorer débit » = 0.4, poids utilité « ne pas nuire » = 0.6 ..... | 80 |
| Figure-A I-1 Correspondance entre TCP, MPTCP et la couche transport .....                                                                                                                                                                                                                                       | 87 |
| Figure-A I-2 Étapes d'initialisation d'une connexion MPTCP .....                                                                                                                                                                                                                                                | 88 |
| Figure-A I-3 Étapes pour l'ajout de sous-session avec le sous-type MP_JOIN .....                                                                                                                                                                                                                                | 89 |
| Figure-A I-4 Différents champs du sous-type Data Sequence Signal .....                                                                                                                                                                                                                                          | 90 |
| Figure-A I-5 Exemple de mappage des données et distribution aux sous-sessions .....                                                                                                                                                                                                                             | 91 |

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

|          |                                                    |
|----------|----------------------------------------------------|
| 4G       | Forth Generation                                   |
| AP       | Access Point                                       |
| APSO     | Accelerated Particle Swarm Optimization            |
| ARIMA    | Autoregressive Integrated Moving Average           |
| ARMA     | Autoregressive Moving Average                      |
| CMT-SCTP | Concurrent Multichemin Transfer for SCTP           |
| DES      | Double Exponential Smoothing                       |
| EnodeB   | Evolved Node B                                     |
| ES       | Exponential Smoothing                              |
| IANA     | Internet Assigned Numbers Authority                |
| IUMDP    | Integrated user Utility in Markov Decision Process |
| LTE      | Long Term Evolution                                |
| MA       | Moving Average                                     |
| MDP      | Markov Decision Process                            |
| MPRTP    | Multipath Real-time Transport Protocol             |
| MPTCP    | Multipath TCP Protocol                             |
| MSS      | Maximum Segment Size                               |
| PSO      | Particle Swarm Optimization                        |
| QoS      | Quality of Service (qualité de service)            |
| RFC      | Request For Comments                               |
| RSS      | Received Signal Strength                           |
| RTT      | Round Trip Time                                    |

## XVIII

|       |                                                 |
|-------|-------------------------------------------------|
| SCTP  | Stream Control Transmission Protocol            |
| SINR  | Signal to Interference plus Noise Ratio         |
| SISO  | Single In Single Out                            |
| TCP   | Transport Control Protocol                      |
| UFMDP | Utility Function and Markov Decision Process    |
| VoIP  | Voice over Internet Protocol                    |
| WIFI  | Wireless Fidelity                               |
| WIMAX | Worldwide Interoperability for Microwave Access |

## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

|                          |                                                                                                                                       |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $E_b$                    | Énergie par bit au récepteur,                                                                                                         |
| $g_j^s(\mathbb{x}, \pi)$ | Gain net de récompense du nœud d'accès $s$ et pour l'utilisateur de classe $j$                                                        |
| $I_0$                    | Densité de l'interférence plus le bruit                                                                                               |
| $k$                      | Coefficient de récompense pour l'utilité nulle                                                                                        |
| $k_1$                    | Coefficient de récompense pour la zone de tolérance                                                                                   |
| $k_2$                    | Coefficient de récompense pour la zone de satisfaction                                                                                |
| $\lambda_1$              | Taux d'arrivée des utilisateurs de classe 1                                                                                           |
| $\lambda_2$              | Taux d'arrivée des utilisateurs de classe 2                                                                                           |
| $\mu_1$                  | Taux de service pour les utilisateurs de classe 1                                                                                     |
| $\mu_2$                  | Taux de service pour les utilisateurs de classe 2                                                                                     |
| $p_j^s(\mathbb{z}, \pi)$ | Prix caché pour une connexion de classe $j$ acceptée dans le nœud d'accès $s$ dans l'état réseau $\mathbb{z}$ sous la politique $\pi$ |
| $R_b$                    | Débit de transmission du signal                                                                                                       |
| $r_{1\_base}$            | Taux de récompense utilisateur classe 1 pour le chemin unique                                                                         |
| $r_{2\_base}$            | Taux de récompense utilisateur classe 2 pour le chemin unique                                                                         |
| $r_{1\_imme}$            | Taux de récompense utilisateur classe 1 pour multichemin immédiat                                                                     |
| $r_{2\_imme}$            | Taux de récompense utilisateur classe 2 pour multichemin immédiat                                                                     |
| $r_j$                    | Taux de récompense utilisateur classe $j$                                                                                             |
| $\mathcal{T}_1$          | Seuil d'utilité pour la zone de tolérance                                                                                             |
| $\mathcal{T}_2$          | Seuil d'utilité pour la zone de satisfaction                                                                                          |
| $u_j^s(c_i)$             | Utilité du critère $c_i$ pour l'utilisateur de classe $j$ au nœud d'accès $s$                                                         |
| $u_j^s$                  | Utilité de l'opérateur pour le nœud d'accès $s$ et la classe d'utilisateurs $j$                                                       |

|                   |                                                                              |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $\mathcal{U}_j^s$ | Utilité agrégée pour le nœud d'accès $s$ et pour l'utilisateur de classe $j$ |
| $W$               | Largeur de bande du canal de transmission                                    |
| $w_{ct}$          | Poids du critère coût                                                        |
| $w_{dr}$          | Poids du critère débit                                                       |
| $w_{dl}$          | Poids du critère délai                                                       |
| $w_{pl}$          | Poids du critère perte de paquets                                            |
| $w_o$             | Poids de l'utilité de l'opérateur                                            |
| $w_{rss}$         | Poids du critère puissance de signal reçu                                    |
| $w_u$             | Poids de l'utilité de l'utilisateur                                          |
| $\mathbb{X}$      | États de chaque nœud d'accès                                                 |
| $\mathbb{Z}$      | États du réseau                                                              |

## INTRODUCTION

L'évolution fulgurante des réseaux sans fil de ces dernières décennies a vu l'apparition de différentes technologies radio. Au niveau des réseaux cellulaires, les technologies ont évolué de la première génération, offrant un débit d'environ 14,4 kbps à la quatrième (« 4G », « LTE »), largement en usage aujourd'hui offrant environ 1 Gbps. Au niveau des réseaux sans fil à large bande, les technologies telles que le WiMAX avec les normes 802.16a/d et 802.16e et le WIFI avec les normes 802.11b, 802.11a/g, 802.11ac, 802.11ax (brouillon), 802.11ay (brouillon) ont vu le jour. L'apparition de ces normes radio est motivée d'une part par la demande des utilisateurs qui font usage maintenant de nouveaux types de médias tels que la vidéo en haute définition, les services VoIP (Voice over Internet Protocol) de haute qualité et les jeux interactifs, et d'autre part par le grand nombre d'utilisateurs ainsi que leur grande densité dans les zones couvertes. Pour une utilisation satisfaisante, les applications nécessitent de bonnes valeurs de qualité de service (QoS). Il faut remarquer qu'aujourd'hui ces différentes technologies convergent vers la 5G qui annonce des débits de plusieurs dizaines de Gbps et pouvant servir encore plus d'utilisateurs simultanés.

Les opérateurs de réseaux, dans le souci de satisfaire leurs clients ont déployé plusieurs technologies radio dont certaines ont des zones de couverture qui se chevauchent, offrant ainsi des réseaux sans fil hétérogènes aux utilisateurs leur permettant d'avoir accès à plus d'une technologie radio dans une zone donnée.

Dans le même ordre d'idée, les fabricants d'appareils utilisateurs ont intégré les cartes d'accès de différentes technologies radio permettant ainsi à ces appareils d'utiliser les ressources dans les réseaux sans fil hétérogènes.

Dans le but de mieux exploiter les ressources radio disponibles, l'idée d'utiliser plusieurs technologies radio de façon conjointe pour transférer un même flux de données a été étudiée à plusieurs niveaux, dont l'exploitation au niveau transport du protocole multichemin, le Multipath TCP (MPTCP), proposé en 2013.

Une action primordiale d'un utilisateur qui se trouve dans un réseau sans fil hétérogène comme celui illustré à la figure 0.1 est le choix des réseaux d'accès qui vont lui permettre d'échanger les données tout en ayant la meilleure qualité de service possible offerte par les réseaux d'accès disponibles. L'importance de cette sélection de réseau d'accès est accentuée par l'utilisation du nouveau paradigme du multichemin qui permet d'utiliser plusieurs nœuds d'accès et donc plusieurs chemins pour joindre le cœur du réseau de l'opérateur.

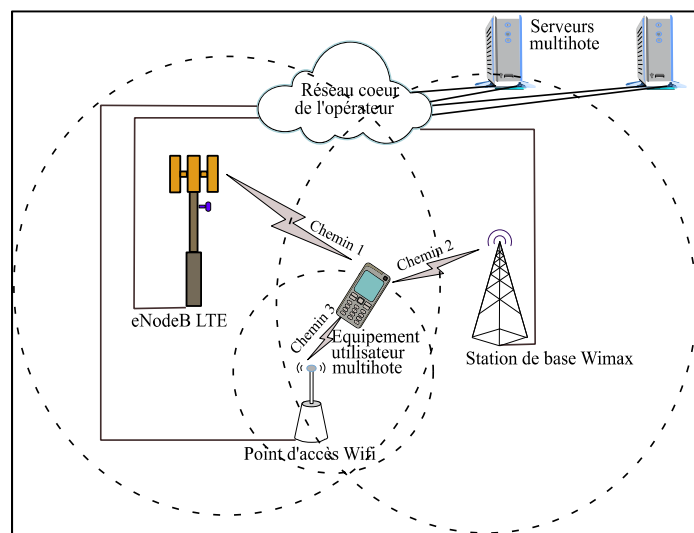


Figure 0. 1 Exemple de réseau sans fil hétérogène

Le nœud d'accès est l'élément principal par lequel on accède à un réseau d'accès. Pour cette raison, et parce que les calculs pour le choix du réseau d'accès se rapportent essentiellement à ces nœuds, **nous utiliserons dans cette thèse le terme sélection de nœuds d'accès pour désigner la sélection de réseau d'accès.**

Pour évaluer les bénéfices apportés par l'utilisation du multichemin et proposer d'autres améliorations sur le fonctionnement et les performances du multichemin, un cadre de test est nécessaire. Le plus souvent, avoir accès à un banc de test avec des équipements réels pour les réseaux sans fil est difficile. Par conséquent, l'implémentation du protocole multichemin dans un simulateur de réseaux informatiques est utilisée. Il est important que celle-ci adhère le plus près possible au contenu du RFC pour faciliter son port dans les équipements réels et être compatible avec toutes les autres implémentations possibles.

## **Méthodologie de recherche**

Notre proposition de sélection de réseaux d'accès sans fil hétérogène pour les dispositifs multihôtes comprend deux aspects : la sélection des réseaux d'accès et l'implémentation du protocole MPTCP.

Pour la sélection des réseaux d'accès. Nous proposons deux modèles ; le premier modèle, dénommé UFMDP (Utility Function and MDP – soit Fonction Utilité et MDP), se base sur la valeur agrégée des utilités des nœuds d'accès pour l'utilisateur et pour l'opérateur qui sont calculées séparément. L'utilité de l'utilisateur est calculée avec une fonction utilité et celle de l'opérateur avec le processus décisionnel de Markov. Le deuxième modèle dénommé IUMDP (Integrated user Utility in MDP – soit Utilité utilisateur Intégré à MDP) calcule l'utilité combinée opérateur-utilisateur en tenant compte d'une pénalité de QoS de l'utilisateur qui réduit la récompense d'acceptation de la connexion qui va à l'opérateur.

Pour MPTCP , nous utilisons le simulateur de réseau Omnet++ pour implémenter les trames de signalisation et autres fonctionnalités du protocole. Nous ajoutons à cette implémentation un répartiteur de sous-flux qui permet d'envoyer des parties d'un flux de données à transmettre sur des chemins différents ainsi qu'une automatisation de la prise de décision d'ajout de chemin. Cette implémentation de MPTCP sert à tester les modèles de sélection de nœuds d'accès pour le multichemin.

## **Plan de la thèse**

Le CHAPITRE 1 présente d'abord la motivation de cette recherche et la problématique liée à la sélection des nœuds d'accès dans les réseaux sans fil hétérogènes. Suit un aperçu comparatif des travaux précédents avec les modèles proposés dans cette thèse en montrant les points principaux des méthodes utilisées dans les articles et une description des différences entre les approches pour adresser la sélection des nœuds d'accès. Enfin, les originalités des modèles de sélection des nœuds d'accès proposés referment le chapitre.

Dans le CHAPITRE 2, nous présentons le modèle économique de la sélection des nœuds d'accès. D'abord, nous énonçons les hypothèses sur l'acquisition des métriques de QoS des utilisateurs et les statistiques sur les comportements des utilisateurs. Ensuite, nous décrivons la méthode de décision basée sur les utilités ainsi que les agrégations d'utilités de plusieurs critères.

Nous décrivons au CHAPITRE 3 le premier modèle de sélection de nœuds d'accès, UFMDP qui est basée sur le calcul séparé des utilités de l'utilisateur et de l'opérateur. D'abord, il y a la présentation des blocs fonctionnels du modèle, les agencements entre les blocs et les résultats de leurs sorties. Ensuite, nous détaillons le calcul de l'utilité de l'utilisateur en montrant la fonction utilité retenue et les équations pour le calcul de l'utilité. Enfin, nous décrivons le calcul de l'utilité de l'opérateur en présentant le concept de prix caché du nœud d'accès et sa relation avec le gain net du réseau, suivi de la description de la sélection des nœuds d'accès par un processus décisionnel de Markov (MDP) et l'objectif de la maximisation du revenu de l'opérateur de réseau.

Dans le CHAPITRE 4 il est question du deuxième modèle de sélection de nœuds d'accès, IUMDP, qui calcule l'utilité combinée opérateur-utilisateur en une seule opération avec MDP. Nous commençons par préciser le modèle basé sur l'itération de la politique avec une pénalité d'utilité additionnelle. Ensuite, nous présentons les concepts du calcul de la pénalité et nous donnons les équations à utiliser. Finalement, nous faisons une comparaison entre les deux modèles de sélection de nœuds d'accès UFMDP et IUMDP.

Le CHAPITRE 5 met l'emphasis sur la sélection des nœuds d'accès pour le multichemin. Nous donnons la particularité du choix des nœuds à utiliser ainsi que l'adaptation du paramètre de récompense dans les cas d'utilisation de multichemin immédiat (utilisation de plusieurs chemins au départ de la session) et séquentiel (démarrage de session avec un chemin puis ajout d'autres chemins par la suite).

Dans le CHAPITRE 6, nous parlons du protocole multichemin. Après avoir présenté le résumé des principes et le fonctionnement de ce protocole, nous décrivons ensuite son implémentation dans le simulateur de réseaux informatiques en donnant des détails sur les modules conçus, leurs fonctionnements et leurs agencements. Pour finir, nous expliquons comment l'utilisateur peut démarrer et utiliser ce protocole selon ses besoins.

Le CHAPITRE 7 présente les résultats des simulations pour évaluer les performances des modèles de sélection des nœuds d'accès proposés et du protocole multichemin. Nous commençons par décrire la topologie du réseau et les différents scénarios. Ensuite, nous présentons les données numériques utilisées dans les simulations. Finalement, les graphiques des résultats de la simulation ainsi que les analyses des résultats clôturent le chapitre.

Cette thèse s'achève par une conclusion dans laquelle nous rappelons la problématique et les solutions que nous lui avons proposé suivie de recommandations que nous jugeons pertinentes.



## **CHAPITRE 1**

### **PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE ET TRAVAUX RÉLIÉS**

#### **1.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord la motivation qui nous a amenés à faire cette recherche, la problématique reliée à la sélection de nœuds d'accès dans les réseaux sans fil hétérogènes et à l'amélioration des métriques de QoS. Ensuite, nous donnons un aperçu comparatif des travaux précédents sur le sujet. Enfin, une description de l'originalité des modèles de sélection de nœuds d'accès proposés referme le chapitre.

#### **1.2 Motivation**

La sélection du nœud d'accès est importante dans un environnement hétérogène, car elle détermine la QoS de la communication. Lors de l'utilisation du multichemin, les valeurs de délai, de gigue, de perte de paquets et de débit de bout en bout dépendent principalement des nœuds d'accès utilisés. La méthode de sélection de nœuds d'accès basée uniquement sur la mesure de la puissance du signal reçu RSS (Received Signal Strength) ne garantit pas la satisfaction des utilisateurs, car cette satisfaction est généralement basée sur plusieurs métriques de QoS. En outre, en présence de différentes technologies radio ayant des caractéristiques de transmission différentes, l'utilisation de mesures RSS sans normalisation peut entraîner des erreurs.

Non seulement il faut tenir compte des différentes technologies radio, mais aussi il faut tenir compte des objectifs des différents intervenants soit l'utilisateur et l'opérateur de réseaux. L'utilisateur se soucie surtout des éléments de QoS tels que le débit, le délai, les pertes de paquets ainsi que du coût d'utilisation des connexions et de la consommation d'énergie de son appareil. L'opérateur de réseau, de son côté, a pour souci de rentabiliser au maximum son infrastructure par la gestion efficace de l'utilisation de ses réseaux.

La complexité de la sélection des nœuds d'accès due à la prise en compte des objectifs des différentes parties et des différentes métriques fait qu'il n'y a pas de solutions complètes existantes à adopter. Dans les travaux qui suivent, nous proposons donc des méthodes de sélection des nœuds d'accès qui tiennent compte de plusieurs métriques dont les importances sont ajustables aux applications en usage dans l'équipement de l'utilisateur.

Le besoin d'améliorer les métriques de QoS (débit, délai...) poussé par les nouveaux types de médias utilisés de nos jours (vidéos en flux continu et en haute qualité, jeux interactifs, données voix haute qualité, etc.) nous amène à étudier les transferts en multichemin pour améliorer les métriques de QoS. De ce fait, l'implémentation d'un des protocoles multichemin, le Multipath TCP (MPTCP) pour tester ses performances et proposer des améliorations est nécessaire.

### **1.3 Travaux précédents**

Dans la littérature, il existe plusieurs articles qui traitent de la sélection des nœuds d'accès dans les réseaux sans fil hétérogènes. L'utilisation et l'implémentation du protocole multichemin, le MPTCP, ont aussi fait l'objet de publications. Dans ce qui suit, les travaux précédents reliés à la recherche effectuée sont regroupés en paragraphes selon les méthodes et selon l'axe de la recherche.

La méthode de sélection de nœuds d'accès basée uniquement sur la mesure du RSS ne garantit pas la satisfaction de l'utilisateur, car cette satisfaction est généralement basée sur plusieurs métriques de QoS. Les faiblesses de cette méthode sont souvent décrites par exemple dans (W. Hashim, 2013) où les auteurs listent la sous-utilisation des ressources réseau, le manque d'équité et le manque d'équilibrage de charge dans le réseau. La méthode de sélection par RSS basée sur l'analyse de puissance du signal reçu est conventionnellement utilisée pour faire du transfert intercellulaire. On la retrouve dans les articles comme (Yan, Ahmet Şekercioğlu, & Narayanan, 2010) et (Kassar, Kervella, & Pujolle, 2008) mais certains auteurs comme dans (Miyim, Ismail, Nordin, & Mahardhika, 2013) et (Gita, Mahamod, & Rosdiadee, 2015) arguent

qu'il est seulement utile pour démarrer le transfert intercellulaire et que l'addition d'autres métriques de QoS est nécessaire pour avoir des résultats satisfaisants.

Le plus souvent, plusieurs critères sont impliqués dans la sélection des nœuds d'accès pour éviter de négliger certains paramètres de QoS importants. Dans cette catégorie, nous trouvons les méthodes de décision multicritère qui peuvent être appliquées à la sélection de nœuds d'accès tels que AHP (Analytic Hierarchy Process) dans (Saaty, 1980), ELECTRE (Élimination Et Choix Traduisant la Réalité) dans (Roy, 1978) et TOPSIS (Technique de l'ordre de préférence par similitude avec la solution idéale) dans (Hwang, Lai, & Liu, 1993). Ces méthodes utilisent l'évaluation et la comparaison de valeurs de critères pour classer les solutions alternatives à des problèmes de décision complexes. La combinaison de ces méthodes permet généralement de prendre une meilleure décision. Par exemple, dans (Sgora, Chatzimisios, & Vergados, 2010), les auteurs combinent les méthodes AHP et TOPSIS sur des critères pour sélectionner les nœuds d'accès pour des applications spécifiques. Dans (Charilas, Markaki, Psarras, & Constantinou, 2009), AHP, ELECTRE et la logique floue sont utilisés conjointement pour la sélection de nœuds d'accès. La combinaison de TOPSIS et de la logique floue est utilisée dans (Falowo & Chan, 2011) pour la sélection du réseau. Dans (Wang et al., 2017) la logique floue et l'algorithme génétique sont combinés pour définir un cadre de sélection des réseaux d'accès et dans (Liang, Yu, Guo, & Qin, 2019) les réseaux de neurones basés sur la logique floue permettent de prendre en compte les préférences des utilisateurs et du réseau. Le constat à travers ces méthodes est la disparité des métriques utilisées et leur profusion. Malheureusement, ces méthodes ne tiennent pas compte du dynamisme du réseau (comportement de connexion et charges des utilisateurs).

L'utilisation de fonctions utilités pour la sélection du réseau d'accès est une autre approche. Dans cette approche, la satisfaction d'une entité (utilisateur ou opérateur réseau) est obtenue en comparant, à l'aide d'une fonction utilité, les valeurs demandées et celles obtenues de certains critères retenus. La méthode de sélection du réseau d'accès présentée dans (L. Chen, Shu, & Wang, 2010) utilise une fonction utilité personnalisée qui se concentre uniquement sur

la satisfaction de l'utilisateur. Dans (Y.-H. Chen, Yang, Chang, & Ren, 2007), les auteurs prennent en compte l'utilité de l'opérateur en prenant soin de l'équilibrage de charge du réseau.

Le processus décisionnel de Markov (MDP, Markov Decision Process) est un outil de prise de décision puissant qui a été utilisé pour la sélection des nœuds d'accès dans plusieurs travaux comme dans (Khloussy, Gelabert, & Jiang, 2015) et dans (Singh, Alpcan, Agrawal, & Sharma, 2010). MDP a été aussi utilisé dans les articles (Shuo & Qi, 2016) et (Jiandong, Ying-Chang, Yiyang, Jun, & Li, 2017). La particularité de cette méthode est qu'elle se base sur l'analyse des états des systèmes et de leur évolution dans le temps, ce qui est bien adapté aux réseaux de télécommunications où les caractéristiques des liens de communication et le comportement des utilisateurs changent souvent. Si les articles traitant de la sélection des réseaux d'accès sans fil avec MDP partagent le même modèle de base, les traitements pour définir les états des réseaux d'accès et les méthodes de résolution diffèrent dans la façon dont la solution finale est traitée. Malheureusement, la mise en œuvre et l'utilisation dans un environnement réel de MDP sont souvent complexes en raison de la grande taille du modèle exact. Pour faire face à cette complexité, dans l'approche proposée, nous adoptons une forme modifiée de MDP qui garde l'efficacité du MDP original.

Malgré l'existence de plusieurs techniques de sélection de nœuds d'accès, nous pouvons constater plusieurs faiblesses dans les propositions existantes. Par exemple, l'utilisation des techniques de décision multicritère telles que trouvées dans certains journaux, par exemple (Bari & Leung, 2007) et (Verma & Singh, 2013), semble être statique puisque les auteurs ne présentent ni ne montrent comment intégrer les changements dans les réseaux (états des nœuds d'accès et comportement des utilisateurs) dans la prise de décision. De plus, certains travaux traitant la sélection de nœuds d'accès pour le multichemin, par exemple (Ramaboli, Falowo, & Chan, 2013), (Partov & Leith, 2015), ne sont pas adaptés pour une utilisation réelle du multichemin et de son protocole MPTCP associé, car les auteurs n'utilisent pas le standard (RFC 6824). En outre, la prise en compte conjointe des besoins des utilisateurs, des opérateurs et des applications est limitée dans la littérature examinée.

## 1.4 Contribution de recherche

Il existe un grand nombre de travaux sur la sélection de nœuds d'accès. Cependant, aucun algorithme standard ou méthode de sélection n'a été adopté à grande échelle. La nécessité de cette sélection de nœuds d'accès est encore plus accentuée avec l'utilisation du paradigme de multichemin. Notre contribution à la résolution de cette problématique de sélection des nœuds d'accès intègre les éléments énumérés ci-dessous et vise à rendre plus pratique (pour l'utilisation dans les équipements), plus équitable envers les partis concernés qui sont l'opérateur et l'utilisateur et efficace cette sélection des nœuds d'accès dans les réseaux sans fil hétérogènes :

- **Utilisation d'une forme décomposée de MDP**

L'utilisation du processus décisionnel de Markov pour sélectionner les nœuds d'accès permet de prendre en compte le caractère dynamique des activités des utilisateurs ainsi que les variations des conditions de transmission de données. Nous utilisons dans cette thèse une forme décomposée de MDP avec le concept de prix caché pour réduire la complexité des calculs due au grand nombre d'états à analyser et pour permettre son implémentation dans les équipements utilisateurs. La forme décomposée utilisée ici garde l'efficacité du MDP original, car notre décision est issue de la comparaison des gains des nœuds d'accès ;

- **Utilités conjointes de l'utilisateur et de l'opérateur**

La décision basée sur les utilités de l'utilisateur et de l'opérateur permet de prendre en compte les exigences de l'utilisateur concernant les métriques de QoS aussi bien que celles de l'opérateur qui cherche à tirer le maximum de profit de l'exploitation de ses infrastructures ;

- **Intégration de l'utilité de l'utilisateur dans MDP**

Le modèle MDP de base, qui calcule l'utilité de l'opérateur, ne tient pas compte de la QoS fournie à l'utilisateur. En effet, dans la formule qui maximise le gain de l'opérateur, la récompense est attribuée pour chaque connexion acceptée au nœud d'accès sans égard à la QoS fournie par le nœud pendant le transfert de données, ce qui peut résulter en une frustration de l'utilisateur s'il y a dégradation de la QoS pendant le transfert de données.

L'intégration de l'utilité de l'opérateur dans MDP permet d'assujettir la valeur de récompense de nœud à l'utilité de l'utilisateur et donc la maximisation du gain de l'opérateur permettra de fournir un minimum d'utilité à l'utilisateur ;

- **Implémentation de MPTCP conforme à la RFC**

Pour le multichemin, le protocole MPTCP utilisant la couche transport a été adopté et les guides de conception sont consignés dans la RFC 6824. L'implémentation du multichemin permet de tester les atouts de ce protocole multichemin et aussi de proposer des améliorations sur certains de ses mécanismes ;

- **Scénarios de validation réalistes**

Pour apprécier les atouts des méthodes de sélection de nœuds d'accès et ceux du multichemin, il est important de les tester dans un environnement réel. À défaut d'accès à une infrastructure de réseaux sans fil avec de vrais utilisateurs ayant des comportements réels, nous avons adopté dans la simulation des scénarios réalistes qui prennent en compte le grand nombre d'utilisateurs, leurs comportements concernant les fréquences et les durées de connexions aux réseaux.

## 1.5 Publications et soumissions

### Journaux

Firmin Mah, Zbigniew Dziong, Jean-Charles Grégoire 2018. «MDP Based Access Network Selection in Heterogeneous Wireless Environment with Multihomed Devices» (**soumis**).

### Conférences

F. Mah, Z. Dziong, and J. C. Grégoire, "Economic access network selection in heterogeneous wireless networks environment," *2015 International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet)*, 16-19 Dec. 2015, Piscataway, NJ, USA, 2015, pp. 124-30: IEEE.

## **1.6 Résumé du chapitre**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la motivation de cette recherche sur la sélection des nœuds d'accès dans les réseaux sans fil hétérogènes. Ensuite, nous avons fait un survol de la littérature sur les méthodes de sélection des nœuds d'accès. Enfin nous avons souligné les points essentiels de notre contribution à la recherche des solutions à la problématique de la sélection des nœuds d'accès dans les réseaux sans fil hétérogènes.

Dans le chapitre 2 suivant, nous présentons le premier modèle économique de la sélection des nœuds d'accès.



## **CHAPITRE 2**

### **MODÈLE ÉCONOMIQUE DE LA SÉLECTION DES NŒUDS D'ACCÈS**

#### **2.1 Introduction**

Ce chapitre présente les éléments du modèle économique adopté pour faire la sélection des nœuds d'accès. D'abord, nous exprimons les hypothèses posées pour permettre l'utilisation du modèle et des métriques et nous mentionnons le recueil des statistiques de ces métriques. Ensuite, nous présentons la décision multicritère basée sur les utilités et finalement, nous décrivons l'agrégation des utilités.

#### **2.2 Hypothèses**

Le réseau sans fil hétérogène traité est la propriété d'un seul opérateur ou d'opérateurs organisés en coalition. Par conséquent, l'utilité et les revenus de tous les nœuds d'accès vont au même opérateur ou à l'entité coalition d'opérateurs. Ici, nous ne traitons pas la question de la distribution des revenus aux opérateurs faisant partie de la coalition.

Les nœuds d'accès stockent les caractéristiques d'utilisation du réseau telles que la fréquence de connexion des utilisateurs, leur durée et les métriques de QoS (débit, perte de paquets et délai), et les mettent à la disposition des équipements utilisateurs (les algorithmes de sélection des nœuds d'accès sont exécutés dans l'équipement utilisateur). Ces enregistrements de statistiques, compilés à partir de l'observation de l'utilisation du réseau sur une longue période, sont une pratique courante que les opérateurs de réseaux utilisent pour améliorer leurs services. Ici, nous utilisons ces statistiques pour calculer les utilités des utilisateurs et de l'opérateur pour le choix des nœuds d'accès.

La capacité d'un nœud d'accès est exprimée par le nombre maximal d'utilisateurs qu'il peut servir simultanément, par conséquent, le nœud d'accès ne peut pas accepter de nouvel

utilisateur lorsqu'il a atteint sa capacité maximale. La contrainte de limitation de ressources est portée sur le nœud d'accès car en général, les liens filaires du nœud d'accès au réseau cœur sont le plus souvent à larges bandes (ex. fibre) et donc offrant des débits très grands.

Les utilisateurs du réseau sont regroupés en classes qui sont différenciées par les valeurs des métriques de QoS demandées et par les taux d'arrivée de la connexion et les taux de service. Les utilisateurs appartenant à une classe  $j$  exigent le même débit de données minimum, le même délai maximum sur les paquets, et ont le même taux de service  $\mu_j$ .

Une connexion de classe  $j$  acceptée dans le réseau procure à l'opérateur une récompense avec un paramètre  $r_j$ . Ce paramètre est une valeur intrinsèque que l'opérateur accorde à l'utilisation d'un nœud d'accès et selon le service fourni à l'utilisateur de classe  $j$ .

### **2.3 Statistiques sur les métriques de QoS et les comportements des utilisateurs**

Les métriques de QoS utilisées sont les débits de transfert des données, les délais sur les transferts et les pertes de paquets qui sont enregistrées dans les nœuds d'accès au fil du temps ; leurs moyennes sont compilées périodiquement. Par exemple, pour chaque connexion d'un utilisateur, le nœud d'accès mesure au niveau de la couche physique la valeur réelle du débit de transmission vers l'utilisateur. Les délais subis par les paquets de données sont calculés en faisant la moyenne des délais subis par les différents paquets de données dans le nœud d'accès, chaque délai étant la différence entre le temps d'arrivée et le temps de sortie du paquet de données du nœud d'accès.

Les statistiques sur les comportements des utilisateurs concernent les fréquences et les durées des connexions aux nœuds d'accès. Le taux moyen d'arrivée des utilisateurs et la durée moyenne des connexions s'obtiennent en compilant les intervalles de temps d'arrivée et les durées de connexion des utilisateurs aux nœuds d'accès.

## 2.4 Décision multicritère basée sur les utilités

Nous avons inclus dans les modèles de sélection de nœuds d'accès proposés une méthode de décision multicritère basée sur les utilités. La prise en compte de plusieurs critères permet de tenir compte des éléments importants de QoS. Dans cette thèse, pour les exemples numériques, nous avons utilisé le débit des données, le délai et le taux de perte de paquets comme critères de QoS ainsi que les critères de coût de connexion et le RSS (voir Tableau 7.2 section 7.4.1). L'aspect économique de l'approche concerne le calcul du gain de l'opérateur de réseaux et est relié au concept de prix caché défini à la section 4.2. La satisfaction à l'égard d'un critère pour l'utilisateur et celle à l'égard du gain reçu par l'opérateur de réseaux sont subjectives. L'utilité reliée à une satisfaction donne une expression quantitative de cette satisfaction.

L'utilité d'un critère est une valeur numérique dans la plage  $[0, 1]$  qui exprime la satisfaction d'une entité (ici l'utilisateur ou l'opérateur) par rapport à la valeur de ce critère reçue du nœud. Par exemple, un utilisateur peut avoir besoin d'un débit de données dans la plage  $[5 \text{ Mbps}, 30 \text{ Mbps}]$  et un nœud d'accès donné peut offrir seulement un débit de données de  $18 \text{ Mbps}$ . En utilisant une fonction utilité, comme celle présentée à la section 3.3, nous pouvons calculer l'utilité de l'utilisateur pour ce débit de données pour le nœud d'accès en question.

## 2.5 Agrégation des utilités des critères

Les utilités des critères sont calculées séparément. Il faut donc les regrouper en utilisant une méthode d'agrégation pour avoir l'utilité finale. Nous décrivons ici deux des méthodes d'agrégation les plus utilisées soit l'agrégation additive et l'agrégation multiplicative.

Nous utilisons les notations suivantes :

- $\mathcal{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  Ensemble de  $n$  critères pour la sélection des nœuds d'accès ;
- $\mathcal{W} = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  Ensemble des poids respectifs des critères avec  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$  ;
- $w_u$  et  $w_o$  Poids des utilités de l'utilisateur et de l'opérateur, respectivement ;
- $\mathcal{S} = \{1, 2, \dots, S\}$  Ensemble de  $S$  nœuds d'accès dans le réseau ;
- $\mathcal{J} = \{1, 2, \dots, J\}$  Ensemble de  $J$  classes d'utilisateurs ;
- $u_j^S(c_i)$  Utilité du critère  $c_i$  pour l'utilisateur de classe  $j$  au nœud d'accès  $s$ .

### 2.5.1 Agrégation additive

L'agrégation additive de plusieurs utilités s'obtient en faisant la somme des utilités pondérées par leurs poids respectifs soit  $\mathcal{U} = \sum_{i=1}^n w_i u(c_i)$ .

Cette méthode d'agrégation est simple et claire. Cependant, comme noté dans (Quoc-Thinh, Ghamri-Doudane, & Agoulmine, 2008), elle ne permet pas de tenir compte de l'interdépendance des critères de sélection des nœuds d'accès dans les réseaux de télécommunications. Par exemple, de toute évidence, le débit réel reçu par une application a un lien avec le délai subi par les paquets de données. Plus le délai est grand, plus le nombre de bits de données reçus par unité de temps dans l'application sera faible.

### 2.5.2 Agrégation multiplicative

L'agrégation multiplicative de plusieurs utilités s'obtient en faisant le produit des utilités élevées à la puissance de leurs poids respectifs soit  $\mathcal{U} = \prod_{i=1}^n [u(c_i)]^{w_i}$ . Les auteurs dans (J.D. Bentkover, 1986) montrent que cette méthode tient compte de l'interdépendance des éléments agrégés et permet en plus de ne pas négliger entièrement les critères ayant des poids faibles.

## 2.6 Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons abordé de façon globale le modèle de la sélection des nœuds d'accès en présentant les hypothèses prises en compte, les statistiques utilisées et le concept de la sélection des nœuds d'accès basée sur les utilités. Ensuite, nous avons présenté les différentes façons d'agréger les utilités individuelles des critères pour obtenir une utilité globale. Dans le chapitre suivant, nous rentrerons dans les détails des calculs des utilités.

## CHAPITRE 3

### SÉLECTION DE NŒUD D'ACCÈS BASÉ SUR LES UTILITÉS SÉPARÉES

#### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous détaillons le modèle de sélection de nœuds d'accès basé sur l'agrégation des utilités de l'opérateur et de l'utilisateur calculées séparément. Ce modèle, dénommé UFMDP (Utility Function and MDP – soit Fonction Utilité et MDP), calcule l'utilité de l'utilisateur avec une fonction utilité et l'utilité de l'opérateur avec MDP. Nous présentons d'abord la fonction utilité et ensuite la définition des concepts de prix caché et du gain net qui sont enfin utilisés pour calculer l'utilité de l'opérateur.

#### 3.2 Algorithme du modèle de sélection

La structure générale du modèle de sélection de nœuds d'accès, UFMDP, est illustrée par la figure 3.1. La première étape, étiquetée 1, a deux parties. Dans la première partie (bloc du haut), nous calculons l'utilité de l'utilisateur. Pour chaque nœud d'accès, nous calculons l'utilité de chaque critère retenu. Ces utilités sont ensuite agrégées pour obtenir l'utilité totale de l'utilisateur pour le nœud.

Selon les notations introduites à la section 2.5, l'utilité agrégée de l'utilisateur obtenue par l'agrégation multiplicative s'obtient comme suit :

$$u_j^s(\mathbf{C}, \mathbf{w}) = \prod_{i=1}^n [u_j^s(c_i)]^{w_i}, j \in J, s \in \mathcal{S}, \sum_i w_i = 1 \quad (3.1)$$

où  $u_j^s(c_i)$  est l'utilité du critère  $c_i$  pour l'utilisateur de classe  $j$  au nœud d'accès  $s$ ,  $c_i$  est le critère  $i$  appartenant à l'ensemble des critères  $\mathbf{C}$  et  $w_i$  le poids du critère  $i$ .

Dans la seconde partie de la première étape, nous calculons l'utilité de l'opérateur pour chaque nœud d'accès et chaque classe d'utilisateur en utilisant le concept de prix caché et le gain net définis à la section 3.4. Cette utilité exprime la satisfaction de l'opérateur par rapport au gain

net de récompense  $g_j^s(\mathbf{x}, \pi)$  (voir sous-section 3.4.2 pour le calcul) qui peut être obtenu en acceptant un utilisateur de classe  $j$  au nœud d'accès  $s$  dans l'état  $\mathbf{x}$  (défini dans la section 3.4.1) selon la politique de sélection de nœuds d'accès  $\pi$ . Pour donner une définition générale du mot politique dans les processus de décision de Markov, nous citons : « Les processus décisionnels de Markov permettent de modéliser la dynamique de l'état d'un système soumis au contrôle d'un agent, au sein d'un environnement stochastique. On nomme alors politique (notée  $\pi$ ), ou stratégie, la procédure suivie par l'agent pour choisir à chaque instant l'action à exécuter. » (Sigaud & Buffet, 2008, p. 20). Ensuite, nous utilisons la normalisation par la racine carrée pour calculer l'utilité de l'opérateur  $u_j^s$  pour le nœud d'accès  $s$  et la classe d'utilisateur  $j$  en fonction du gain net par :

$$u_j^s = \frac{g_j^s(\mathbf{x}, \pi)}{\sqrt{\sum_{i=1}^S (g_j^i(\mathbf{x}, \pi))^2}}, s \in \mathcal{S}, j \in \mathcal{J} \quad (3.2)$$

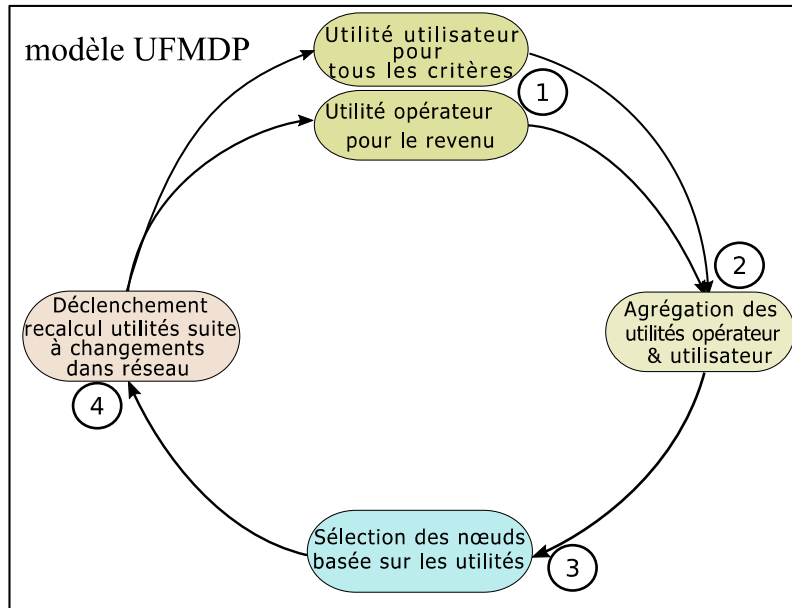


Figure 3.1 Modèle UFMDP de la sélection des nœuds d'accès

Les calculs des utilités de l'utilisateur et de l'opérateur sont détaillés aux sections 3.3 et 3.4 respectivement.

Dans la deuxième étape, étiquetée 2 sur la figure 3.1, nous calculons l'utilité totale pour le nœud d'accès  $s$  et l'utilisateur de classe  $j$ . La méthode d'agrégation multiplicative est encore utilisée et l'utilité agrégée pour le nœud d'accès  $s$  s'exprime par :

$$\mathcal{U}_j^s = \mathcal{U}_j^{s^{w_u}} \cdot u_j^{s^{w_o}}, s \in \mathcal{S}, j \in \mathcal{J}, w_u + w_o = 1 \quad (3.3)$$

où  $\mathcal{U}_j^s$  et  $u_j^s$  sont les utilités respectives de l'utilisateur et de l'opérateur définies dans (3.1) et (3.2), et  $w_u$  et  $w_o$  sont leurs poids respectifs. Ces poids sont fixés par l'opérateur et peuvent être modifiés pour répondre à certains modèles d'affaire ou de situations dans le réseau. L'étape suivante, étiquetée 3, choisit le ou les meilleurs nœuds d'accès à utiliser. Les nœuds d'accès avec les plus grandes utilités sont retenus pour le transfert de données. L'étape finale étiquetée 4 dans la figure 3.1 déclenche le recalcul des utilités à la suite de changements dans le réseau qui entraînent des variations des métriques de QoS par exemple un débit inférieur à 10 Mbps ou un délai supérieur à 20 ms.

### 3.3 Calcul de l'utilité de l'utilisateur

Le profil de la courbe de la fonction utilité traduit le degré de satisfaction à l'égard d'un critère. Plusieurs contraintes peuvent influencer ce profil. La courbe doit principalement tenir compte du type de critère qui peut être ascendant ou descendant. Pour un critère ascendant plus la valeur numérique est grande, plus grande est la satisfaction (par exemple le débit de réception). Pour un critère descendant, plus la valeur numérique est faible, plus grande est la satisfaction (par exemple, le délai sur les paquets). Pour le calcul de l'utilité de l'utilisateur définie à la section 2.4, nous avons adopté la fonction sigmoïdale présentée dans (Quoc-Thinh et al., 2008) et illustrée sur la figure 3.2. Nous avons choisi cette fonction car elle tient compte du fait que le niveau de satisfaction ne démarre qu'à partir d'un seuil minimum de la valeur de critère et qu'une fois la satisfaction atteinte, l'augmentation de la valeur de critère ne modifie plus la satisfaction.

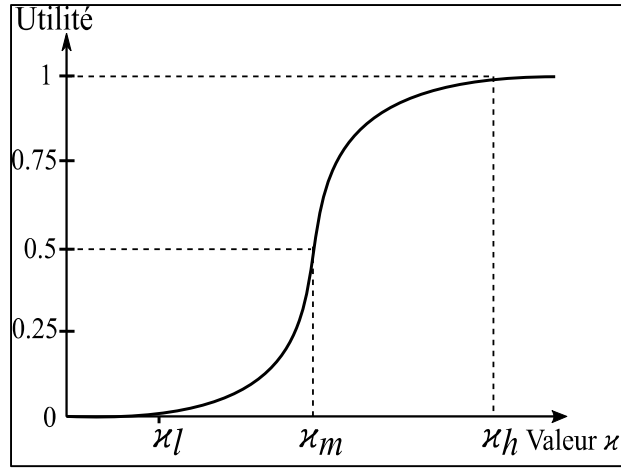


Figure 3.2 Fonction sigmoïdale pour le calcul de l'utilité de l'utilisateur

L'équation ci-dessous correspond à la fonction sigmoïdale et permet de calculer la valeur de l'utilité pour un critère  $\kappa$  donné.

$$u(\kappa) = \begin{cases} 0, & \kappa_n < \kappa_l \\ \frac{\left(\frac{\kappa_n - \kappa_l}{\kappa_m - \kappa_l}\right)^\zeta}{1 + \left(\frac{\kappa_n - \kappa_l}{\kappa_m - \kappa_l}\right)^\zeta}, & \kappa_l \leq \kappa_n \leq \kappa_m \\ 1 - \frac{\left(\frac{\kappa_h - \kappa_n}{\kappa_h - \kappa_m}\right)^\gamma}{1 + \left(\frac{\kappa_h - \kappa_n}{\kappa_h - \kappa_m}\right)^\gamma}, & \kappa_m \leq \kappa_n \leq \kappa_h \\ 1, & \kappa_n > \kappa_h \end{cases} \quad (3.4)$$

où les paramètres sont définis comme suit :

$\zeta \geq \max \left\{ \frac{2(\kappa_m - \kappa_l)}{\kappa_h - \kappa_m}, 2 \right\}$  : coefficient d'ajustement du paramètre d'inclinaison de la courbe

$\gamma = \frac{\zeta(\kappa_h - \kappa_m)}{\kappa_m - \kappa_l}$  : paramètre d'inclinaison de la courbe

$\kappa_n$  : valeur numérique obtenue pour le critère  $\kappa$

$\kappa_l$  : valeur minimale acceptable pour le critère  $\kappa$

$\kappa_h$  : valeur maximale désirée pour le critère  $\kappa$

$\kappa_m$  : frontière entre zones de satisfaction et de non-satisfaction

L'équation (3.4) est utilisée pour un critère ascendant et la forme  $1 - u(\kappa)$  est utilisée pour un critère descendant.

### 3.4 Calcul de l'utilité de l'opérateur

Nous utilisons les concepts de prix caché et du gain net qui sont combinés dans la forme décomposée de MDP pour calculer l'utilité de l'opérateur.

#### 3.4.1 Concept de prix caché et gain net

Considérons le réseau en tant que système où chaque connexion de classe  $j$  acceptée dans le réseau donne à l'opérateur du réseau une récompense avec un taux  $q_j$  durant le temps de service de connexion représenté par sa valeur moyenne  $1/\mu_j$ . Le taux de récompense peut être défini en fonction du paramètre de récompense de la connexion  $r_j$ , interprété comme récompense moyenne pour l'acceptation de la connexion de classe  $j$ .

$$q_j = r_j \mu_j \quad (3.5)$$

Dans l'éventualité où une demande de connexion est rejetée, la récompense de la connexion sera perdue. À partir de là, nous définissons le prix caché comme la perte probable des revenus futurs due à des connexions rejetées en raison de l'acceptation de la demande de connexion actuelle. Nous illustrons ce concept de prix caché défini dans (Dziong, 1997) par la figure 3.3. Dans la figure 3.3 a), nous avons un réseau avec deux nœuds d'accès et des utilisateurs qui sont connectés (cercles pleins) ou qui veulent se connecter (cercles vides) à ces nœuds d'accès. Le nœud d'accès 2 a une capacité limitée à 4 utilisateurs. L'utilisateur  $a$  peut se connecter au nœud d'accès 1 ou au nœud d'accès 2. Supposons que, comme montré à la figure 3.3 b), l'utilisateur  $a$  ait décidé de se connecter au nœud d'accès 2. Par la suite, quand l'utilisateur  $b$  voudra se connecter au nœud d'accès 2, sa demande de connexion sera rejetée parce que le nœud d'accès 2 aura déjà atteint sa capacité maximale. Ce rejet est une perte de revenus pour l'opérateur et est dû à l'admission précédente de l'utilisateur  $a$  au nœud d'accès 2.

Compte tenu de ce concept de prix caché, les utilisateurs, en sélectionnant un nœud d'accès, peuvent donc éviter de causer une perte de revenus à l'opérateur s'ils ont connaissance de l'évolution des états des nœuds d'accès.

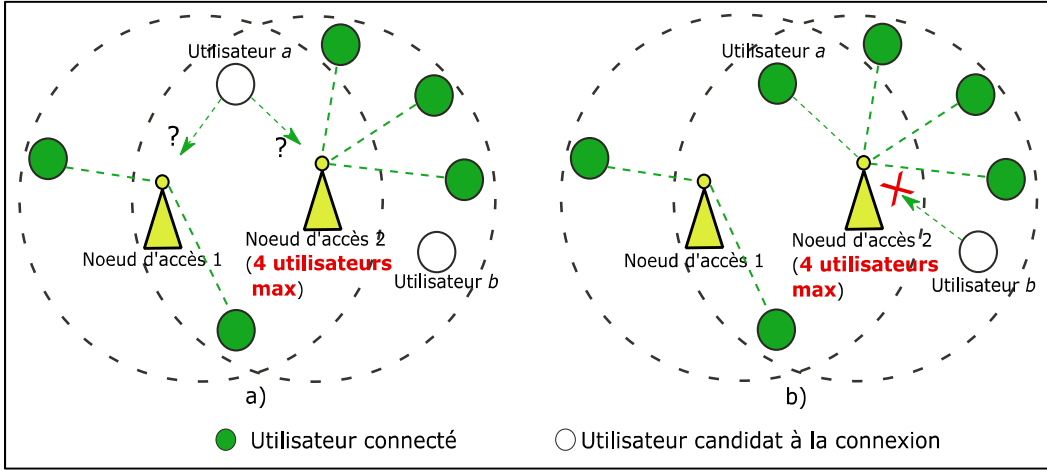


Figure 3.3 Illustration du concept de prix caché

Notons par  $p_j^s(\mathbf{z}, \pi)$  le prix caché pour une connexion de classe  $j$  acceptée dans le nœud d'accès  $s$  dans l'état réseau  $\mathbf{z} = [z_j^s]$  appartenant à l'espace d'état du réseau  $\mathbf{Z}$ , où  $z_j^s$  désigne le nombre de connexions de classe  $j$  utilisant le nœud  $s \in \mathcal{S}$ . Nous pouvons alors définir le gain net du réseau découlant de l'acceptation de la connexion de classe  $j$  au nœud  $s$  dans l'état réseau  $\mathbf{z}$  sous la politique  $\pi$  de sélection de nœuds d'accès par :

$$g_j^s(\mathbf{z}, \pi) = r_j - p_j^s(\mathbf{z}, \pi). \quad (3.6)$$

Nous utilisons la valeur du gain net comme expression de l'utilité de l'opérateur pour l'acceptation d'une nouvelle connexion dans le modèle de sélection de nœuds d'accès considéré dans cette section. L'avantage d'exprimer le gain net comme fonction du prix caché est que les valeurs des prix cachés sont indépendantes de la nouvelle récompense de connexion et donc le stockage des valeurs des politiques des états peut être réduit s'il existe plusieurs classes de connexions différenciées uniquement par le paramètre récompense.

En supposant un processus d'arrivée poissonien et un temps de service de connexion exponentiellement distribué, le système peut être modélisé comme un processus de décision de Markov et la politique optimale de sélection de nœuds d'accès qui maximise la valeur moyenne de récompense du réseau est obtenue par l'algorithme d'itération de politique décrit dans (Dziong, 1997) et consiste aux étapes suivantes :

- 1) *dans le réseau fonctionnant sous la politique de sélection de nœuds d'accès  $\pi$ , qui tient compte de  $p_j^s(\mathbb{z}, \pi)$ , estimer les paramètres du processus de Markov et en utilisant ces valeurs, calculer les valeurs améliorées des prix cachés des nœuds  $p_j^s(\mathbb{z}, \pi')$  ;*
- 2) *pour chaque demande de connexion de classe  $j$ , implémenter la politique améliorée en sélectionnant parmi tous les nœuds possibles celui qui offre le gain net maximum*

$$g_{max} = \max_{s \in \mathcal{S}} g_j^s(\mathbb{z}, \pi') = \max_{s \in \mathcal{S}} [r_j - p_j^s(\mathbb{z}, \pi')] \quad (3.7)$$

*Si le gain net est négatif, rejeter la demande.*

*Retourner à l'étape 1.*

Sous des conditions de trafic stationnaires, la procédure itérative ci-dessus converge vers la politique optimale de sélection de nœuds d'accès qui maximise la récompense moyenne obtenue du réseau, définie par :

$$\bar{R}(\pi) = \sum_{j \in J} \bar{\lambda}_j r_j = \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{j \in J} \bar{\lambda}_j^s r_j \quad (3.8)$$

où  $\bar{\lambda}_j$  est le taux des connexions de classe  $j$  acceptées dans le réseau et  $\bar{\lambda}_j^s$  est le taux des connexions de classe  $j$  acceptées au nœud  $s \in \mathcal{S}$ .

L'algorithme d'itération sur la politique analyse les états du réseau pour trouver la politique optimale. Le nombre d'états du réseau est la combinaison du nombre d'états des nœuds d'accès. Pour chaque nœud d'accès, le nombre d'états est formé par le vecteur de dimension  $J$  (nombre de classes d'utilisateur), chaque dimension étant délimitée par la capacité du nœud d'accès exprimée par le nombre maximal d'utilisateurs simultanés que ce nœud peut servir. La figure

3.4 illustre le nombre d'états et le diagramme des transitions d'état pour un nœud d'accès qui peut admettre 4 utilisateurs qui sont répartis en 2 classes.

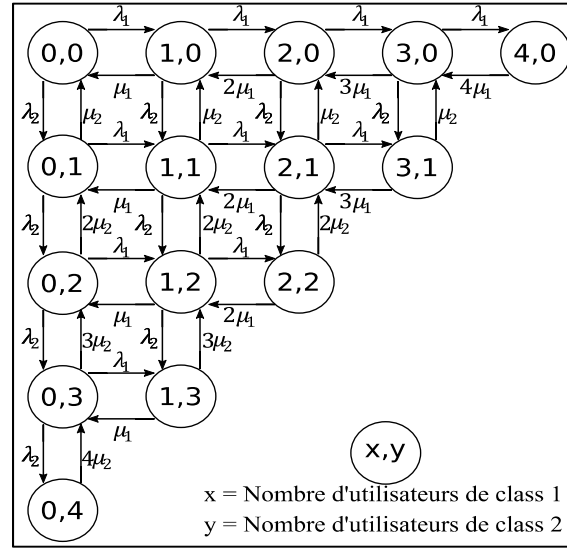


Figure 3.4 Transitions d'état pour un nœud de capacité 4 et 2 classes d'utilisateurs

Pour un nœud d'accès  $s$  qui peut admettre  $k$  utilisateurs répartis en deux classes, le nombre d'états est donné par :

$$N_s = \sum_{i=1}^{k+1} i \quad (3.9)$$

Le nombre total d'états pour un réseau avec  $M$  nœuds d'accès est le produit du nombre d'états de tous les nœuds d'accès et est donné par :

$$N_T = \prod_{m=1}^M N_m \quad (3.10)$$

Nous pouvons remarquer que les capacités des nœuds d'accès d'aujourd'hui, en ce qui concerne le nombre d'utilisateurs, peuvent atteindre des dizaines, voire des centaines d'utilisateurs, entraînant un nombre d'états énorme pour les réseaux. Par conséquent, le modèle de processus de Markov, basé sur l'état exact du réseau, souffre de complexité dans sa mise en œuvre.

Pour résoudre ce problème, nous décomposons le processus de Markov du réseau entier en un ensemble de processus de Markov de nœuds d'accès indépendants en supposant que chaque demande de service de nœud d'accès forme un processus d'arrivée de connexion de Poisson indépendant. Cette approche est analogue au cadre présenté dans (Dziong, 1997) pour les réseaux maillés câblés où il a été montré que pour les réseaux de taille réaliste (une dizaine de nœuds d'accès), l'erreur sur le revenu de l'opérateur est négligeable. Sous l'hypothèse d'indépendance des processus d'arrivée des nœuds d'accès, le processus d'arrivée du réseau peut être décomposé séparément pour chaque nœud d'accès  $s \in \mathcal{S}$ . Nous désignons par le vecteur  $\mathbf{x} = [x_j]$  les états de chaque nœud d'accès où  $x_j$  est le nombre d'utilisateurs de classe  $j$  connectés au nœud d'accès et par  $\lambda_j^s(\mathbf{x}, \pi)$  et  $\mu_j$  les taux d'arrivée et de départ, respectivement, pour le nœud d'accès  $s$ . Les valeurs de  $\lambda_j^s(\mathbf{x}, \pi)$  et  $\mu_j$  sont trouvées par estimation basée sur des mesures statistiques dans le réseau comme indiqué dans les hypothèses au chapitre 2.

### 3.4.2 Calcul du gain net et du prix caché dans MDP décomposé

Après décomposition du processus de Markov, les prix cachés des nœuds  $p_j^s(\mathbf{x}, \pi)$  peuvent être calculés indépendamment pour chaque nœud après modification de l'algorithme d'itération de la politique comme suit :

- 1) *dans le réseau fonctionnant sous la politique de sélection de nœuds d'accès  $\pi$ , qui tient compte de  $p_j^s(\mathbf{z}, \pi)$ , estimer les paramètres du processus de Markov  $\lambda_j^s(\mathbf{x}, \pi)$  et  $\mu_j$ , puis avec ces valeurs, calculer les valeurs améliorées des prix cachés des nœuds  $p_j^s(\mathbf{x}, \pi')$  ;*
- 2) *pour chaque demande de connexion de classe  $j$ , implémenter la politique améliorée en sélectionnant parmi tous les nœuds possibles celui qui offre le gain net maximum*

$$g_{\max} = \max_{s \in \mathcal{S}} g_j^s(\mathbf{x}, \pi') = \max_{s \in \mathcal{S}} [r_j - p_j^s(\mathbf{x}, \pi')] \quad (3.11)$$

*Si le gain net est négatif, rejeter la demande.*

*Retourner à l'étape 1.*

Dans ce modèle décomposé, pour une politique  $\pi$  de sélection de nœuds d'accès, chaque processus de récompense de nœud d'accès peut être décrit indépendamment par l'ensemble  $\{r_j, \lambda_j^s(\mathbb{x}, \pi), \mu_j\}$  de sorte que nous pouvons définir le gain net  $g_j^s(\mathbb{x}, \pi)$  comme la récompense espérée pour l'acceptation de la connexion de classe  $j$  à ce nœud d'accès  $s$  se trouvant dans l'état  $\mathbb{x}$ . Le taux de récompense du nœud d'accès dans l'état  $\mathbb{x}$  est donné par :

$$q(\mathbb{x}) = \sum_{j \in J} r_j x_j \mu_j \quad (3.12)$$

Pour des valeurs de  $\lambda_j^s(\mathbb{x}, \pi)$  et  $\mu_j$ , le gain net  $g_j^s(\mathbb{x}, \pi)$  et les prix cachés correspondants  $p_j^s(\mathbb{x}, \pi)$  s'obtiennent en appliquant l'algorithme d'itération par valeurs défini dans (Cavazos-Cadena, 2002; Schweitzer & Federgruen, 1979). Puisque cet algorithme a été développé pour les processus de Markov à temps discret, son application à notre processus de Markov à temps continu nécessite une uniformisation du temps de séjour par un temps moyen  $\tau$  suivant les travaux présentés dans (Grassmann, 1977). Après l'uniformisation du temps de séjour, nous calculons les fonctions de valeurs pour notre système avec la relation de récurrence suivante :

$$\begin{aligned} V_n^s(\mathbb{x}, \pi) &= q(\mathbb{x})\tau \\ &+ \sum_{j \in J^s} \lambda_j^s(\mathbb{x}, \pi)\tau [V_{n-1}^s(\mathbb{x} + \delta_j, \pi) - V_{n-1}^s(\mathbb{x}, \pi)] \\ &+ \sum_{j \in J} x_j \mu_j \tau [V_{n-1}^s(\mathbb{x} - \delta_j, \pi) - V_{n-1}^s(\mathbb{x}, \pi)] \\ &+ V_{n-1}^s(\mathbb{x}, \pi), \quad s \in \mathcal{S} \end{aligned} \quad (3.13)$$

où  $n$  est l'indice d'itération et  $\delta_j$  un vecteur de dimension  $J$  avec 1 dans la position  $j$  et 0 partout ailleurs.  $+\delta_j$  représente l'arrivée d'un utilisateur de classe  $j$  au nœud d'accès et  $-\delta_j$  représente le départ d'un utilisateur de classe  $j$  du nœud d'accès. Après que l'algorithme d'itération par valeurs ait convergé (les variations sur les valeurs de  $V_n^s(\mathbb{x}, \pi)$  deviennent très faibles), voir aussi dans (Bellman, 1966; Bertsekas, 1987) pour la convergence, nous obtenons les gains nets et les prix cachés des nœuds d'accès par :

$$\begin{aligned}
 g_j^s(\mathbb{x}, \pi) &= \lim_{n \rightarrow \infty} [V_n^s(\mathbb{x} + \delta_j, \pi) - V_n^s(\mathbb{x}, \pi)] \\
 p_j^s(\mathbb{x}, \pi) &= r_j - g_j^s(\mathbb{x}, \pi).
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

### 3.5 Résumé du chapitre

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle de sélection de nœuds d'accès UFMDP qui calcule séparément l'utilité de l'utilisateur avec la fonction sigmoïdale et l'utilité de l'opérateur avec le gain net de nœud. Ces utilités utilisateur et opérateur sont agrégées et servent à décider des nœuds d'accès à utiliser. Pour l'utilité de l'opérateur, nous avons utilisé la forme décomposée du processus de Markov en ramenant l'analyse des états du réseau à celle des états des nœuds pour réduire la complexité des calculs due au très grand nombre d'états du réseau. Dans le prochain chapitre, nous présenterons un modèle alternatif de sélection de nœuds d'accès.



## CHAPITRE 4

### SÉLECTION DE NŒUD D'ACCÈS BASÉ SUR MDP AVEC PENALITÉ

#### 4.1 Introduction

Ce chapitre présente un modèle de sélection de nœuds d'accès qui est aussi basé sur le processus décisionnel de Markov mais, ici, l'utilité de l'utilisateur est intégrée au MDP qui optimise la récompense moyenne de l'opérateur. Le système de poids des utilités du modèle UFM DP donne une certaine liberté à l'opérateur pour donner plus ou moins d'utilité à l'une ou l'autre des parties (opérateur ou utilisateur). Mais, puisque l'attribution des poids est généralement décidée par l'opérateur, ceci met l'utilisateur dans une situation défavorable. Le modèle qui suit, en liant le revenu de l'opérateur à l'utilité de l'utilisateur, garantit que l'opérateur, en voulant maximiser son revenu, fournira un minimum de QoS à l'utilisateur. L'intégration de l'utilité de l'utilisateur dans MDP est faite en introduisant une pénalité qui réduit la récompense d'acceptation de la connexion et cette réduction est une fonction du niveau de l'utilité de l'utilisateur. Ce modèle est appelé IUM DP (Integrated user Utility in MDP (Utilité utilisateur intégrée dans MDP)). Dans ce qui suit, nous présentons d'abord le modèle basé sur l'itération de la politique avec une pénalité additionnelle d'utilité. Ensuite, le modèle du calcul de la pénalité est présenté.

#### 4.2 Itération de la politique avec ajout de pénalité d'utilité

L'intégration des utilités de l'utilisateur et de l'opérateur dans MDP se fait en réduisant le taux de récompense de la connexion par un taux de pénalité qui est une fonction de la valeur de l'utilité de l'utilisateur pour le nœud sélectionné. Évidemment, plus l'utilité de l'utilisateur est grande, plus la pénalité est faible. Dans ce cas, le taux de récompense de connexion de classe  $j$  pour une connexion acceptée dans le nœud d'accès  $s$  est défini comme suit :

$$q_j = r_j \mu_j - c_j^s(\mathcal{U}_j^s) \quad (4.1)$$

où  $c_j^s(\mathcal{U}_j^s)$  est le taux de pénalité qui est fonction de l'utilité de l'utilisateur de classe  $j$  pour le nœud d'accès  $s$ . L'objectif de la sélection du nœud d'accès est de trouver la politique optimale  $\pi^*$  qui maximise la récompense moyenne obtenue du réseau et cette moyenne est définie par :

$$\bar{R}(\pi) = \sum_{j \in J} (r_j - \bar{c}_j / \mu_j) \bar{\lambda}_j \quad (4.2)$$

où  $\bar{c}_j$  est le taux moyen de la pénalité de l'utilité pour les connexions de classe  $j$  acceptées au nœud d'accès  $s$ . Notons que la valeur moyenne de récompense obtenue du réseau peut être présentée comme la somme des récompenses moyennes provenant des différents nœuds d'accès comme suit :

$$\bar{R}(\pi) = \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} (r_j - \bar{c}_j^s / \mu_j) \bar{\lambda}_j^s \quad (4.3)$$

où  $\bar{c}_j^s$  est le taux de pénalité moyen pour l'acceptation des connexions de classe  $j$  au nœud d'accès  $s$ .

Maintenant, de façon semblable au modèle présenté dans la section 3.4.1, nous pouvons définir  $p_j^s(\mathbf{z}, \pi)$  comme le prix caché pour la connexion de classe  $j$  acceptée au nœud d'accès  $s$  dans l'état réseau  $\mathbf{z} = [z_j^s]$  sous la politique  $\pi$  de sélection de nœuds d'accès. Ensuite, nous pouvons définir le gain net du réseau dû à l'acceptation de la connexion de classe  $j$  au nœud  $s$  dans l'état réseau  $\mathbf{z}$  comme suit :

$$g_j^s(\mathbf{z}, \pi) = r_j - c_j^s(\mathcal{U}_j^s) / \mu_j - p_j^s(\mathbf{z}, \pi) \quad (4.4)$$

Il est important de souligner que si  $c_j^s(\mathcal{U}_j^s)$  dépend de la position de la nouvelle connexion (RSS dans l'utilité de l'utilisateur), ce n'est pas le cas pour  $p_j^s(\mathbf{z}, \pi)$  puisqu'il s'agit d'un coût relié à une connexion future. Ensuite, en supposant un processus d'arrivée de Poisson, le système peut être modélisé par le processus de décision de Markov. La politique optimale de

sélection des nœuds d'accès qui maximise la valeur moyenne de la récompense du réseau définie par (4.3) est obtenue par l'algorithme suivant :

- 1) *dans le réseau fonctionnant sous la politique de sélection de nœuds d'accès  $\pi$ , qui tient compte de  $p_j^s(\mathbf{z}, \pi)$ , estimer les paramètres du processus de Markov et les taux moyens de pénalité d'utilité (fonction de  $\mathbf{z}$ ), ensuite, en utilisant ces valeurs, calculer les valeurs améliorées des prix cachés des nœuds  $p_j^s(\mathbf{z}, \pi')$  ;*
- 2) *pour chaque demande de connexion de classe  $j$ , implémenter la politique améliorée en sélectionnant parmi tous les nœuds possibles celui qui offre le gain net maximum*

$$g_{\max} = \max_{s \in \mathcal{S}} [r_j - c_j^s(\mathbf{u}_j^s) / \mu_j - p_j^s(\mathbf{z}, \pi')] \quad (4.5)$$

*Si le gain net est négatif, rejeter la demande.*

*Retourner à l'étape 1.*

De manière analogue au modèle exact d'itération de politique décrit dans la section 3.4.2, et en raison de la cardinalité de l'état du réseau et de la complexité du processus d'arrivée de la connexion, le calcul des prix cachés  $p_j^s(\mathbf{z}, \pi)$  par le modèle MDP exact n'est pas pratique. Par conséquent, nous décomposons à nouveau le processus de Markov du réseau en un ensemble de processus de Markov de nœuds d'accès indépendants en supposant que les demandes de connexion forment des processus de Poisson indépendants dans chaque nœud d'accès. Après la décomposition du processus de Markov, les prix cachés  $p_j^s(\mathbf{x}, \pi)$  peuvent être calculés indépendamment pour chaque nœud et l'algorithme d'itération de la politique est modifié comme suit :

- 1) *dans le réseau fonctionnant sous la politique de sélection de nœuds d'accès  $\pi$ , qui tient compte de  $p_j^s(\mathbf{z}, \pi)$ , estimer les paramètres du processus de Markov ,  $\lambda_j^s(\mathbf{x}, \pi)$ ,  $\mu_j$ , et les taux moyens de pénalité d'utilité  $\bar{c}_j^s$ ; ensuite, en utilisant ces valeurs, calculer les valeurs améliorées des prix cachés des nœuds  $p_j^s(\mathbf{x}, \pi')$  ;*
- 2) *pour chaque demande de connexion de classe  $j$ , implémenter la politique améliorée en sélectionnant parmi tous les nœuds possibles celui qui offre le gain net maximum*

$$g_{max} = \max_{s \in \mathcal{S}} [r_j - c_j^s(\mathcal{U}_j^s) / \mu_j - p_j^s(\mathbb{x}, \pi')] \quad (4.6)$$

*Si le gain net est négatif, rejeter la demande.*

*Retourner à l'étape 1.*

Pour le calcul des prix cachés, nous utilisons le même algorithme d'itération par valeurs décrit dans la section 3.4.2 à la différence que (3.12) devient maintenant

$$q(\mathbb{x}) = \sum_{j \in J} (r_j \mu_j - \bar{c}_j^s) x_j \quad (4.7)$$

pour inclure la pénalité de l'utilité.

### 4.3 Calcul de la pénalité de l'utilité

Le calcul de  $c_j^s(\mathcal{U}_j^s)$  utilise l'utilité totale de l'utilisateur qui est définie et détaillée dans les sections 3.2 et 3.3. Pour concevoir la fonction  $c_j^s(\mathcal{U}_j^s)$ , nous utilisons des hypothèses raisonnables pour nous aider à déterminer sa forme possible et son équation. L'utilité de l'utilisateur est divisée en zones, comme suggéré dans (Sevcik, 2002), soit la zone de frustration, la zone de tolérance et la zone de satisfaction pour l'utilité variant de 0 à 1. Les seuils délimitant les zones, notés  $\mathcal{T}_1$ ,  $\mathcal{T}_2$  peuvent être définis en fonction du paramètre pour lequel l'utilité est considérée. Dans la zone de frustration, nous considérons que la pénalité diminue lentement au fur et à mesure que l'utilité augmente pour indiquer que l'utilisateur restera insatisfait en dessous d'un certain seuil, ici  $\mathcal{T}_1$ . Dans la zone de tolérance, la pente de diminution de la pénalité est élevée pour exprimer la disposition de l'utilisateur à payer pour le service, car il a désormais son exigence minimale satisfaite. Dans la zone de satisfaction, la diminution de la pénalité a de nouveau une faible pente, car la satisfaction de l'utilisateur n'augmente plus beaucoup après avoir atteint un certain niveau de satisfaction délimité par le seuil  $\mathcal{T}_2$ . De plus, nous estimons que la valeur de  $c_j^s(\mathcal{U}_j^s)$  doit être définie en fonction de la

quantité  $r_j\mu_j$ . Comme il n'y a pas de valeur normalisée pour le paramètre de récompense, pour une valeur de paramètre de récompense élevée, la pénalité soustraite de la quantité  $r_j\mu_j$  (voir (4.1)) peut être insignifiante pour agir comme incitatif à l'opérateur pour donner plus de QoS à l'utilisateur. Par conséquent, nous introduisons les constantes  $k$ ,  $k_1$  et  $k_2$  qui permettent d'exprimer la pénalité en fonction du paramètre de récompense. La constante  $k$  permet que l'opérateur reçoive une récompense même pour l'utilité zéro de l'utilisateur (l'utilisateur a utilisé le réseau). Les constantes  $k_1$  et  $k_2$  délimitent les proportions de  $r_j\mu_j$  pour les zones de tolérance et de satisfaction. Selon les remarques ci-dessus,  $c_j^s(\mathcal{U}_j^s)$  peut être représenté par une fonction par morceaux, comme l'illustre la figure 4.1.

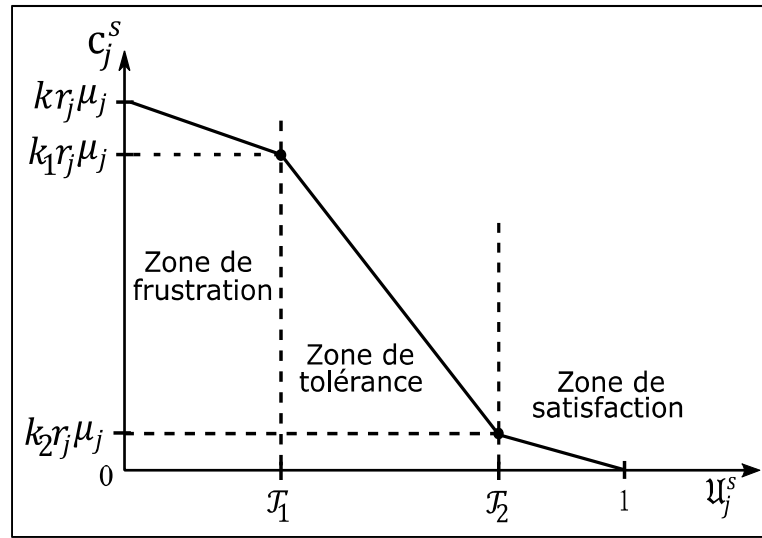


Figure 4.1 Variation de la pénalité en fonction de l'utilité de l'utilisateur

Puisque la fonction est composée de petites zones, nous adoptons une fonction linéaire dans chaque zone pour trouver l'équation de  $c_j^s(\mathcal{U}_j^s)$  exprimée comme suit :

$$c_j^s(\mathcal{U}_j^s) = \begin{cases} \frac{r_j\mu_j(k_1 - k)}{T_1} \mathcal{U}_j^s + kr_j\mu_j, & \mathcal{U}_j^s \in [0, T_1[ \\ r_j\mu_j \left[ \frac{(k_1 - k_2)(\mathcal{U}_j^s - T_1)}{T_1 - T_2} + k_1 \right], & \mathcal{U}_j^s \in [T_1, T_2[ \\ \frac{k_2r_j\mu_j}{T_2 - 1} (\mathcal{U}_j^s - 1), & \mathcal{U}_j^s \in [T_2, 1[ \end{cases} \quad (4.8)$$

#### **4.4 Comparaison des deux modèles**

Nous faisons ici une brève comparaison des deux modèles de sélection de nœuds d'accès. Le modèle UFMDP donne la latitude à l'opérateur de varier les poids des utilités. Ainsi, l'opérateur a la possibilité de modifier ces valeurs en fonction de certaines considérations commerciales. Par exemple, l'opérateur peut augmenter le poids des utilités de certains utilisateurs qui se plaignent de qualité de service insuffisante dans certains endroits. Avec le modèle IUMDP, le revenu de l'opérateur est étroitement lié à l'utilité de l'utilisateur et les deux varient dans le même sens. Cela garantit que l'opérateur donnera plus de QoS aux utilisateurs s'il souhaite augmenter ses propres revenus.

#### **4.5 Résumé du chapitre**

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle de sélection des nœuds d'accès IUMDP qui est une alternative au modèle UFMDP. Dans ce modèle nous utilisons MDP avec une itération sur la politique pour calculer le revenu de l'opérateur. Nous avons intégré dans le calcul du revenu de l'opérateur une pénalité qui peut réduire la valeur de ce revenu et cette pénalité est liée à l'utilité de l'utilisateur. La complexité des méthodes de sélection des nœuds d'accès proposées réside dans le fait qu'il faut fournir en temps réels les résultats des sélections. Les algorithmes d'itération sur la politique et d'itération par valeurs utilisés par MDP sont gourmands en ressources matérielles (quantité de mémoire) et computationnelles surtout quand le nombre d'utilisateurs dans le réseau et celui des nœuds d'accès deviennent grands. Notons qu'il est important pour ces modèles que les statistiques sur les taux et les durées de connexion des classes d'utilisateurs aux nœuds d'accès soient fiables pour une plus grande performance. Nous avons terminé le chapitre avec la courbe et les équations pour le calcul de la pénalité. Dans le chapitre suivant, nous préciserons comment se fait la sélection des nœuds d'accès dans le cas du multichemin et comment adapter les paramètres de récompense.

## CHAPITRE 5

### SÉLECTION POUR LE MULTICHEMIN

#### 5.1 Introduction

La sélection des nœuds d'accès dans le cas d'utilisation en multichemin utilise les modèles présentés dans les chapitres 3 et 4. Nous apportons ici quelques éclaircissements sur les nœuds d'accès à utiliser ainsi que les adaptations des paramètres de récompense de l'opérateur selon que l'utilisateur utilise le multichemin ou non.

#### 5.2 Les nœuds d'accès à utiliser

Les modèles de sélection détaillés aux sections 3.3 et 3.4 calculent chaque utilité de nœud d'accès pour UFMDP ou gain net pour IUMDP et basent leur décision finale sur les valeurs les plus élevées de ces paramètres. En fait, nous maintenons un classement des nœuds d'accès dans l'ordre décroissant des utilités ou des valeurs de gain net. Pour les utilisateurs qui transfèrent les données sur  $n$  chemins, donc utilisant  $n$  nœuds d'accès, les  $n$  premiers nœuds d'accès dans le classement sont utilisés immédiatement pour transférer des données.

#### 5.3 Adaptation du paramètre de récompense de l'opérateur

L'utilisation du multichemin devrait être bénéfique pour les deux parties. D'une part, l'opérateur de réseau qui déploie des ressources pour proposer ce service s'attend à augmenter ses revenus. Par conséquent, il augmente le coût d'utilisation du multichemin. D'autre part, l'utilisateur multichemin qui souhaite avoir une meilleure QoS dans les transferts de données doit être encouragé. Pour cela, l'opérateur doit donner des incitatifs en proposant des rabais aux utilisateurs multichemin. La question de la tarification des connexions par trajets multiples, qui peut être exprimée par les valeurs des paramètres de récompense, est délicate. Une option simple consiste à facturer l'utilisation de chaque chemin en tant que connexion indépendante.

Une autre option consiste à facturer les connexions proportionnellement au débit de transfert, mais cette option est compliquée par le fait que le débit de transfert peut être variable dans le temps. Une autre option consiste à encourager les connexions par chemins multiples en appliquant une forme de rabais aux utilisateurs à chemins multiples. Dans le cas de réseaux non surchargés, cette approche peut présenter des avantages pour les utilisateurs et les opérateurs, car ceux-ci bénéficient d'une meilleure qualité de service tandis que l'opérateur peut augmenter ses revenus en augmentant l'utilisation du réseau. Dans ce qui suit, nous proposons un modèle détaillé de cette option.

Nous divisons les utilisateurs en trois catégories : les utilisateurs à chemin unique, les utilisateurs multichemin immédiat et les utilisateurs multichemin séquentiel. L'utilisateur multichemin immédiat utilise deux chemins ou plus une fois sa session TCP démarrée. La raison peut être qu'il souhaite une connexion fiable lors de son transfert de données ou qu'il veut s'assurer qu'il dispose toujours du maximum de ressources disponibles pendant le transfert de données pour éviter des dégradations épisodiques sur les métriques de QoS (ex. ralentissement du débit ou augmentation du délai). L'utilisateur multichemin séquentiel ajoutera plus de chemins au besoin. Le prix peut être une raison à l'utilisation multichemin séquentiel selon le schéma de prix appliqué par l'opérateur, par exemple si l'opérateur facture des trajets supplémentaires. La limitation de la consommation d'énergie de l'appareil peut être une autre raison, car l'utilisation simultanée de plusieurs interfaces entraîne une plus grande consommation d'énergie. Ou il peut simplement s'agir du désir d'être équitable avec les autres utilisateurs du réseau, ce qui conduit à ne pas utiliser plus de ressources si cela n'est pas nécessaire, comme le suggèrent les directives de conception du MPTCP (C. R. A. Ford, M. Handley, S. Barre, 2011). Nous notons par  $r_{j_{base}}$  le paramètre de récompense de base correspondant à la connexion par chemin unique de l'utilisateur de classe  $j$ , par  $r_{j_{imme}}$  le paramètre de récompense correspondant à la connexion multichemin immédiate de l'utilisateur de classe  $j$  et par  $r_{j_{seq}}$  le paramètre de récompense correspondant à la connexion multichemin séquentielle de l'utilisateur de classe  $j$ . Ensuite, un système de rabais est utilisé. Voici un exemple :

- Utilisateur multichemin immédiat : rabais de  $d\%$  sur le second chemin quand il utilise 2 chemins et rabais de  $\mathfrak{D} \%$  sur le troisième chemin quand il utilise 3 chemins.
- Utilisateur multichemin séquentiel : rabais de  $s \%$  sur chaque chemin additionnel

Avec  $\mathfrak{D} > d > s$ .

Les paramètres de récompense peuvent s'exprimer comme suit :

$$\begin{aligned} r_{j_{imme}} &= \begin{cases} r_{j_{base}}(2 - d) & \text{pour 2 chemins} \\ r_{j_{base}}(3 - d - \mathfrak{D}) & \text{pour 3 chemins} \end{cases} \\ r_{j_{seq}} &= r_{j_{base}}(1 + n(1 - s)) \text{ pour } n \text{ chemins additionnels} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Des exemples numériques illustrant les performances de ce plan d'escompte sont présentés dans la section 7.4.2.

## 5.4 Résumé du chapitre

Dans ce chapitre il a été question de préciser les nœuds d'accès à utiliser pour les transferts de données dans les cas d'utilisation du multichemin. Nous avons proposé un exemple d'adaptation des paramètres de récompense qui est en lien avec la facturation des clients qui incite l'utilisation de connexions par trajets multiples par les clients et qui en même temps permet d'augmenter le revenu de l'opérateur. Dans le prochain chapitre, nous donnerons les principes de fonctionnement du MPTCP ainsi que les éléments de son implémentation pratique.



## **CHAPITRE 6**

### **PROTOCOLE MULTICHEMIN**

#### **6.1 Introduction**

L'un des buts de cette thèse est d'apprécier la satisfaction respective de l'utilisateur et de l'opérateur de réseau lors de l'utilisation du multichemin. Dans ce chapitre, en premier lieu, nous décrivons sommairement les principes et fonctionnements de MPTCP ; ensuite nous donnons les détails de notre implémentation de MPTCP dans un simulateur de réseaux reposant sur Omnet++ et enfin nous décrivons notre proposition de déclenchement de l'utilisation du multichemin.

#### **6.2 Principes et fonctionnement**

Cette section est un résumé du fonctionnement du MPTCP, le document RFC 6824 (C. R. A. Ford, M. Handley, O. Bonaventure, 2013) donnant les éléments de la conception de ce protocole MPTCP. Dans l'ANNEXE I nous reprenons son principe et donnons quelques détails sur différentes parties de son fonctionnement. MPTCP appartient à la couche transport et se base sur le protocole TCP. Il se compose de plusieurs sous-modules, chacun se comportant comme un module TCP original. Il est nécessaire d'implémenter des fonctions de gestion pour que les sous-modules puissent travailler ensemble. La figure 6.1 ci-dessous donne une vue schématique de l'implémentation du MPTCP. Les éléments du flux de données provenant de l'application vont successivement à un des sous-modules selon une politique de répartition. Cette politique de répartition exécutée par le module dénommée répartiteur est essentielle, car du côté du destinataire, les flux doivent être délivrés à l'application dans le même ordre que la sortie des flux de l'application expéditrice. Des informations de contrôle sont ajoutées à ces éléments du flux de données pour leur permettre d'être dirigées vers des interfaces différentes.

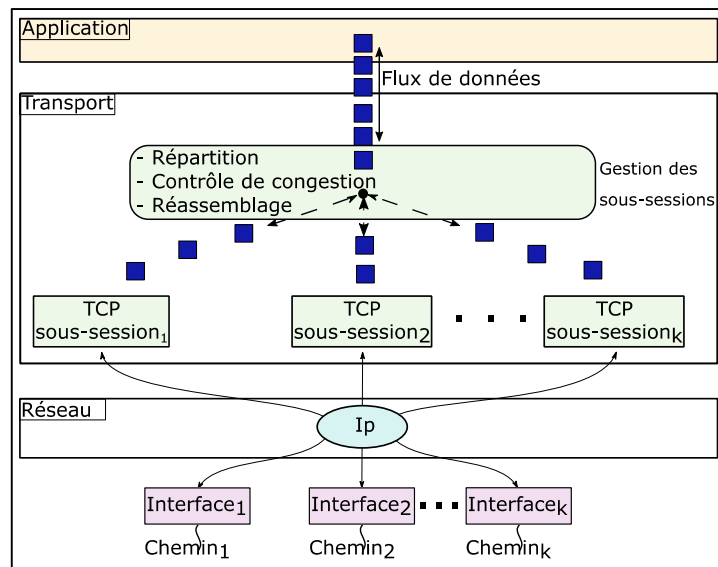


Figure 6.1 Vue schématique de l'implémentation du MPTCP

Pour transférer correctement des données lors d'une session MPTCP et rester compatible avec les sessions non MPTCP, le champ « Options » de l'entête du segment TCP est utilisé pour signaler les opérations MPTCP. L'IANA (Internet Assigned Numbers Authority) a attribué la valeur 30 pour l'option MPTCP et d'autres valeurs numériques (nombres des sous-types) différencient les opérations appelées sous-types dans l'option MPTCP. La figure 6.2 montre un exemple d'entête TCP avec le sous-type MP\_JOIN.

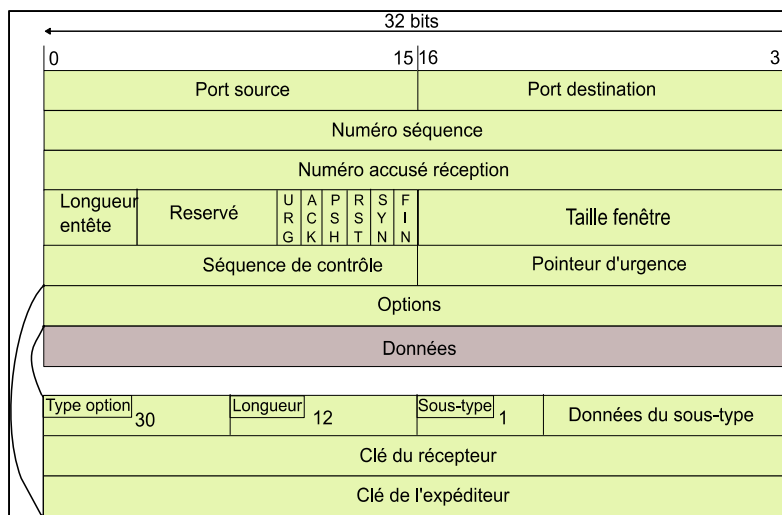


Figure 6.2 Exemple d'entête TCP avec l'option MPTCP et sous -type MP\_JOIN

Le tableau 6.1 énumère les opérations que nous avons implémentées. Pour plus de détails sur les opérations MPTCP, voir (C. R. A. Ford, M. Handley, O. Bonaventure, 2013).

Tableau 6.1 Options MPTCP implémentées

| Symbole/ Nom (sous-type)        | Nombre du sous-type | Description                                                                   |
|---------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| MP_CAPABLE<br>Multipath Capable | 0x0                 | Déclare que l'expéditeur veut utiliser MPTCP                                  |
| MP_JOIN<br>Join Connection      | 0x1                 | Sert à initier un nouveau sous-flux sur un chemin additionnel                 |
| DSS<br>Data Sequence Signal     | 0x2                 | Fait les correspondances entre les séquences des données et les acquittements |
| ADD_ADDR<br>Add Address         | 0x3                 | Permet l'annonce d'adresse additionnelle pour le multichemin                  |

### 6.3 Implémentation du protocole

L'implantation de MPTCP repose sur l'utilisation de modules TCP. Nous avons utilisé les modules TCP existants fournis par le cadre INET associé à Omnet++ auquel nous avons ajouté deux modules nommés « schedulerMerger » et « followerDispatcher » avec les rôles suivants :

- « schedulerMerger »

Pour les données provenant de l'application, ce module effectue l'attribution des numéros de séquence de données et l'application du répartiteur qui sélectionne la sous-session TCP qui doit transmettre les données. Nous avons implémenté le répartiteur basé sur le délai aller-retour (Round-Trip Time, ou RTT) le plus bas, désigné par Lowest-RTT-First (Paasch, Ferlin, Alay, & Bonaventure, 2014). Ce répartiteur sélectionne la sous-session TCP avec le plus bas RTT pour envoyer les données jusqu'à ce que le tampon d'envoi de cette sous-session soit plein. À ce stade, les prochaines données entrantes sont envoyées via la prochaine sous-session TCP avec le RTT le plus bas. Pour les données provenant des

modules TCP, ce module assure le réassemblage des données avant de les délivrer à l'application désignée. Le module gère également le contrôle de congestion couplé entre les modules TCP ;

- « followerDispatcher »

Ce module transmet au module IP les données provenant des modules TCP avec des informations de contrôle permettant de diriger les données vers les interfaces appropriées. Pour les données provenant du module IP, il choisit le module TCP auquel les données doivent être transmises en fonction de la séquence de données des paquets, des numéros d'accusé de réception et des numéros de port.

#### 6.4 Répartiteur des flux aux sous-sessions

Outre la mise en œuvre standard par MPTCP de mécanismes fonctionnels tels que l'établissement d'une connexion, l'ajout de nouvelles sous-sessions et la terminaison de connexion, certains auteurs ont proposé des améliorations au répartiteur de paquets aux sous-sessions. Ce mécanisme de distribution des paquets a une forte implication sur la qualité de service finale (débit et délai de bout en bout) des données transférées par trajets multiples. Plusieurs objectifs sont pris en compte dans le design du répartiteur de paquets. Ainsi le répartiteur de base fourni avec l'implémentation expérimentale de MPTCP, le Lowest-RTT-First a pour but de minimiser le délai sur les paquets transmis, ce qui par conséquent devrait augmenter le débit à l'arrivée. Or ce type de répartiteur a fait surgir d'autres problèmes tels que le « head-of-line blocking » (Scharf & Kiesel, 2007) (blocage en tête de ligne) qui retarde la livraison des paquets arrivés sans ordre à l'application destinataire.

Dans cette section, nous proposons un répartiteur qui intègre deux des principaux objectifs du MPTCP qui sont « Improve Throughput » (améliorer le débit à l'arrivée) et « Do no Harm » (ne pas nuire) spécifié dans (C. Raiciu, 2011). L'objectif « améliorer le débit », comme son titre l'indique, a pour but l'obtention de débits élevés, tandis que l'objectif « ne pas nuire » préconise qu'il ne faut pas altérer les transferts de données d'autres utilisateurs quand certains utilisateurs passent en multichemin.

### 6.4.1 Algorithme de sélection de sous-sessions

L'algorithme de sélection des sous-sessions pour acheminer les paquets est montré à la figure 6.3 et contient quatre étapes. Dans la première étape, nous calculons l'utilité du débit. Nous utilisons un modèle de prédiction de débit pour calculer le débit que chaque sous-session peut fournir en fonction de ses paramètres. Nous utilisons ensuite l'optimisation par essaim de particules, PSO (Particle Swarm Optimization) sur le même modèle de prédiction de débit pour calculer le débit le plus élevé possible de chaque sous-session. Cette valeur de débit le plus élevé possible de chaque sous-session est comparée avec la valeur de débit de la sous-session donnée par le modèle de prédiction en utilisant la fonction utilité détaillée à la section 3.3, ce qui nous donne l'utilité du débit de la sous-session. Le calcul de l'utilité du « ne pas nuire » intervient à la deuxième étape où nous considérons les sous-sessions comme des files d'attente. Nous utilisons ensuite PSO pour calculer la probabilité d'acheminement des flux vers chaque sous-session et cette probabilité représente l'utilité du « ne pas nuire ». Le système de file d'attente considéré est détaillé à la sous-section 6.4.3 et l'algorithme d'optimisation utilisé dans les deux premières étapes est expliqué dans l'annexe II.

Une fois les utilités calculées, nous appliquons à la troisième étape l'agrégation multiplicative définie à la sous-section 2.5.2 pour obtenir l'utilité finale pour chaque sous-session. Pour une sous-session  $e$ , en désignant l'utilité du débit par  $u_d^e$  et l'utilité du « ne pas nuire » par  $u_h^e$ , l'utilité agrégée est donnée par :

$$\mathcal{U}_a^e = u_d^{e w_d} \cdot u_h^{e w_h}, \quad w_d + w_h = 1 \quad (6.1)$$

où  $w_d$  et  $w_h$  sont les poids respectifs de l'utilité du « améliorer le débit » et de l'utilité du « ne pas nuire ».

Dans la quatrième étape, nous choisissons la sous-session à utiliser. Cette sous-session est celle dont la valeur d'utilité agrégée est la plus élevée parmi toutes les utilités agrégées.

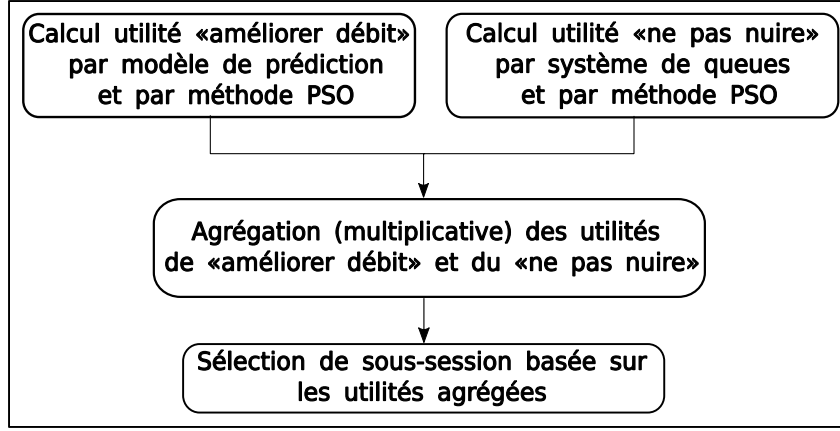


Figure 6.3 Répartiteur basé sur « améliorer le débit » et « ne pas nuire »

#### 6.4.2 Objectif « améliorer le débit »

Pour le flux de données d'une session TCP, nous souhaitons avoir le débit final maximal. Nous utilisons le modèle d'estimation du débit TCP nommé PFTK, présenté dans (Padhye, Firoiu, Towsley, & Kurose, 2000) et largement utilisé dans les recherches comme dans (Yang, 2010) pour prédire le débit que chaque sous-session peut offrir à chaque instant de décision.

Nous considérons un ensemble de  $N$  sous-sessions  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_N\}$ . Pour la  $n^{ième}$  sous-session, la formule de prédiction du débit  $R_n$  est la suivante :

$$R_n = \min \left\{ \frac{W_n}{T_n}, \frac{1}{T_n \sqrt{\frac{2}{3}} b_n l_n + T o_n \min \left( 1, \sqrt{\frac{3}{8}} b_n l_n \right) l_n (1 + 32 l_n^2)} \right\} \quad (6.2)$$

où  $W_n$ ,  $T_n$ ,  $b_n$ ,  $l_n$ ,  $T o_n$  sont, respectivement, la taille maximale de la fenêtre, le RTT, le nombre de paquets par nouvel acquittement, le taux de perte de paquets et le délai d'inactivité initial pour la retransmission. Les paramètres  $W_n$ ,  $b_n$  et  $T o_n$  sont des constantes connues pour chaque sous-session tandis que  $T_n$  et  $l_n$  sont variables et sont mesurés à partir du réseau à chaque moment de décision. Le débit maximum  $R_n^*$  de  $R_n$  qu'une sous-session peut avoir selon ses paramètres fixes est calculé en utilisant la méthode d'optimisation PSO détaillée à l'Annexe II.

La PSO est connu pour son efficacité à trouver rapidement des solutions aux problèmes d'optimisation et présente une facilité de mise en œuvre au point de vue ressources computationnelles et de quantité de mémoire nécessaire.

L'objectif d'optimisation est exprimé comme suit :

$$\text{Maximize } R_n(T_n, l_n) \quad (6.3)$$

Le débit  $R_n$  et sa valeur maximale  $R_n^*$  sont comparés en utilisant la fonction sigmoïde (3.4) pour obtenir l'utilité du débit.  $R_n$  représente la valeur obtenue pour le critère débit et  $R_n^*$  la valeur maximale désirée.

#### 6.4.3 Objectif « ne pas nuire »

Pour satisfaire l'objectif « ne pas nuire », la probabilité de blocage doit être minimisée quand on envoie des paquets à chaque sous-session. L'ensemble des sous-sessions potentielles est maintenant considéré comme un ensemble de  $N$  serveurs indépendants. Chaque serveur est modélisé comme une file d'attente M/M/1/K avec une capacité maximale  $m_n = K$ , pour  $n = \{1, 2, \dots, N\}$ , un taux d'arrivée poissonnien  $\lambda_n$  et un taux de service  $\mu_n$  distribué exponentiellement. La capacité maximale de la file d'attente est la capacité de la mémoire tampon de la sous-session. La durée du service est égale à la durée pendant laquelle la sous-session envoie un segment et reçoit un accusé de réception. Cela correspond au RTT mesuré au moment de la décision. Donc  $\mu_n = 1/RTT_n$  noté ici  $1/T_n$ . Nous voulons envoyer les paquets arrivant dans la file  $n$  avec une probabilité  $p_n$  en fonction de l'état de la file  $x_n$  (représentant le nombre de paquets déjà dans la file). Selon la propriété de décomposition des processus de Poisson, nous avons :

$$\lambda = \sum_{n=1}^N \lambda_n \quad (6.4)$$

avec  $\left\{ \lambda_1 = p_1 \lambda, \quad \lambda_2 = p_2 \lambda, \quad \dots, \quad \lambda_n = p_n \lambda, \quad \sum_{n=1}^N p_n = 1 \right\}$

Lorsque la file d'attente  $n$  est à l'état  $x_n = m_n$  (capacité maximale atteinte),  $p_n = 0$ . La figure 6.4 illustre cette modélisation.

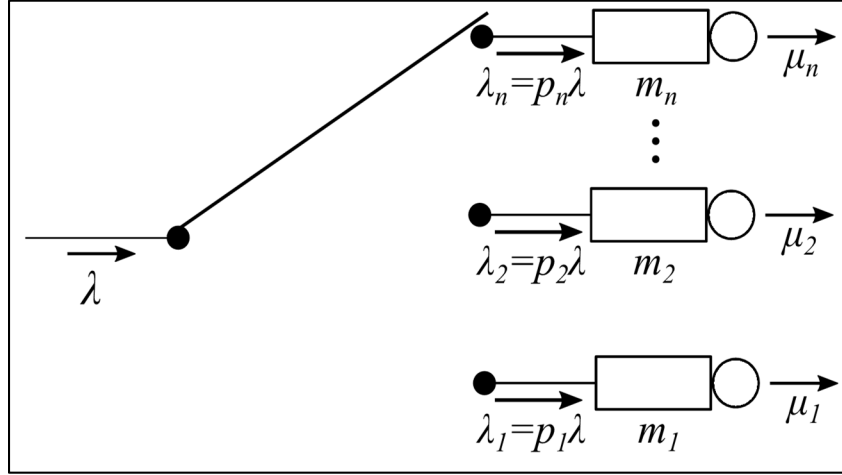


Figure 6.4 Répartiteur de flux modélisé comme un système de files d'attente

Pour une file d'attente avec les paramètres notés comme ci-dessus, la probabilité de blocage  $B_n$  s'exprime comme suit :

$$B_n = \frac{(1 - \rho_n)\rho_n^{m_n}}{1 - \rho_n^{(m_n+1)}}, \rho_n = \frac{\lambda_n}{\mu_n} \quad (6.5)$$

En exprimant  $\lambda_n$  comme  $p_n \lambda$  et  $\mu_n$  comme  $1/T_n$ ,  $B_n$  peut s'écrire

$$B_n = \frac{(1 - p_n \lambda T_n)(p_n \lambda T_n)^{m_n}}{1 - (p_n \lambda T_n)^{(m_n+1)}} \quad (6.6)$$

Dans cette expression de  $B_n$ , les  $m_n$ ,  $T_n$  et  $\lambda$  sont connus (ils sont obtenus par des mesures dans le réseau). L'optimisation de la probabilité de blocage s'exprime comme suit :

$$\text{Minimize } B_n(p_n) \quad (6.7)$$

La résolution de ce problème d'optimisation donne les valeurs des  $p_n$  qui sont utilisées pour déterminer les utilités des sous-sessions.

## 6.5 Déclenchement du multichemin

Avec le MPTCP, les sessions débutent toujours avec un seul chemin. D'autres chemins sont ajoutés par la suite selon les besoins qui obéissent à certains buts comme par exemple augmenter le débit final à l'arrivée ou diminuer le délai de bout en bout sur les données. Cela permet, entre autres, d'éviter le gaspillage de ressources (ne pas utiliser d'autres ressources si le chemin actuel satisfait les paramètres de QoS désirés) et la surconsommation d'énergie (plusieurs interfaces utilisées simultanément consomment plus d'énergie). Le déclenchement de multichemin évoqué ici a trait à la prise de décision d'addition de chemins supplémentaires pour l'utilisateur multichemin séquentiel évoqué au début du chapitre. Il s'agit concrètement d'automatiser cette prise de décision en se basant sur les mesures effectuées en temps réel sur les métriques de QoS.

Nous proposons la décision basée sur la prédiction du débit à l'arrivée qui est un élément essentiel de mesure de QoS. Il est possible de baser la prédiction sur d'autres métriques ou sur des combinaisons de celles-ci. Les données de la métrique de QoS recueillies sur un intervalle de temps sont traitées comme une série temporelle et une méthode de prédiction est appliquée pour trouver la tendance de cette série. Parmi les méthodes de prédiction on peut citer la régression linéaire simple, le lissage exponentiel, la moyenne mobile (MA), les méthodes d'auto-régression telle qu'ARMA (Autoregressive Moving Average), ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) et le filtrage de Kalman.

Le lissage exponentiel (Exponential Smoothing, ou ES) est une procédure permettant de réviser en permanence une prévision à la lumière d'une expérience plus récente. Il attribue des poids décroissants de manière exponentielle en donnant aux observations récentes plus de poids dans les prévisions que les observations plus anciennes. Cette méthode est très utilisée, car elle a l'avantage d'être simple, utilisant une formule récursive qui ne nécessite aucune mémoire de mesures passées (Andrysiak, Saganowski, & Maszewski, 2018; Corberán-Vallet, Bermúdez, & Vercher, 2011). L'ES est léger au point de vue des ressources en calcul et donc est adapté aux équipements portables. Il peut aisément s'adapter avec le temps aux changements de la

variable estimée. Dans (Gardner, 2006) on retrouve des analyses et documentation sur plusieurs variantes du lissage exponentiel dont le lissage exponentiel double (Double Exponential Smoothing, ou DES).

Pour la prévision du débit à l'arrivée nous avons adopté le lissage exponentiel double (Holt, 2004) à cause des atouts évoqués dans le paragraphe précédent. Ce lissage exponentiel double est une extension du lissage exponentiel simple qui ajoute explicitement la prise en charge des tendances dans les séries temporelles à une variable.

L'équation suivante permet de trouver les valeurs prédites pour une période donnée :

$$\begin{cases} s_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)(s_{t-1} + b_{t-1}) \\ b_t = \beta(s_t - s_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \end{cases} \quad (6.8)$$

où  $x_t$  est la valeur de la série temporelle à l'instant  $t$ ,  $s_t$  est une estimation de la donnée de la série temporelle pour l'instant  $t$ ,  $b_t$  est une estimation de la tendance pour l'instant  $t$ ,  $0 < \alpha < 1$  est le facteur de lissage et  $0 < \beta < 1$  est le facteur de tendance.  $\alpha$  et  $\beta$  sont choisis de sorte à minimiser l'erreur quadratique moyenne entre la prédiction et les données mesurées. Pour trouver directement la valeur de prédiction  $Y_{t+m}$  pour une période  $m$  donnée on utilise l'équation suivante :

$$Y_{t+m} = s_t + mb_t, \quad m > 0 \quad (6.9)$$

Pour trouver les valeurs de prédiction, il faut choisir les valeurs initiales. Il existe plusieurs méthodes pour choisir les valeurs initiales pour  $s_t$  et  $b_t$ . Pour l'indice du temps commençant à  $t=1$ , en général on fixe  $s_t = x_t$ , puis on utilise l'une des suggestions suivantes pour  $b_1$  :

$$\begin{aligned} b_1 &= x_2 - x_1 \\ b_1 &= [(x_2 - x_1) + (x_3 - x_2) + (x_4 - x_3)]/3 \\ b_1 &= (x_n - x_1)/(n - 1) \end{aligned} \quad (6.10)$$

Le logigramme de la figure 6.5 montre les étapes pour la décision de déclenchement du multichemin. Le démarrage du calcul de prédiction peut être basé sur une certaine quantité de données à accumuler (exemple après accumulation de 200 valeurs) ou sur un intervalle de temps régulier (exemple aux 2 minutes). Cela dépendra de l'espace de stockage disponible.

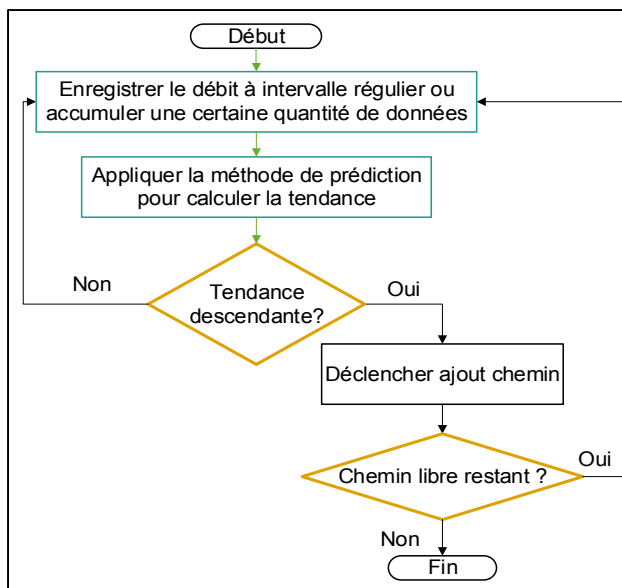


Figure 6.5 Étapes pour l'automatisation du déclenchement du multichemin

## 6.6 Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons abordé l'utilisation du multichemin en présentant dans un premier temps les principes du protocole MPTCP et en résumant notre implémentation de ce protocole dans le simulateur de réseau Omnet++. Dans un deuxième temps, nous avons proposé un répartiteur de flux aux sous-sessions qui est basé sur les objectifs d'amélioration de débit et de ne pas nuire aux utilisateurs non MPTCP. Dans un troisième temps, nous avons proposé une automatisation de la décision d'ajout de chemin supplémentaire pour l'utilisateur qui désire ajouter d'autres chemins selon ses besoins. Dans le prochain chapitre, nous évaluerons les performances des modèles de sélection des nœuds d'accès dans l'environnement sans fil hétérogène avec les équipements multihôtes.



## CHAPITRE 7

### ÉVALUATION DE PERFORMANCE

#### 7.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'évaluation de la performance des trois modèles de sélection de nœuds d'accès. Il s'agit des modèles suivants :

- Sélection par UFMDP (combinaison de MDP et fonction utilité) présenté au chapitre 3.
- Sélection par IUMDP (MDP avec intégration de pénalité liée à l'utilité de l'utilisateur) présenté au chapitre 4.
- Sélection par RSS (puissance de signal reçu), présenté à la section 7.3 de ce chapitre.

Les résultats numériques concernent les revenus de l'opérateur et les métriques de QoS pour les utilisateurs, soit le débit des données à l'application, le délai de bout en bout et les probabilités de blocage. Pour le modèle UFMDP, nous fournissons aussi les variations des revenus de l'opérateur et les variations des débits des utilisateurs en fonction des poids des utilités. Ensuite, nous analysons la sensibilité des probabilités de blocage des différentes classes d'utilisateurs aux valeurs des paramètres de récompense ainsi qu'aux rapports entre les valeurs de ces paramètres de récompense. Il est à noter que les mesures sont effectuées pour les transferts avec chemin unique et pour les transferts avec multichemin. Nous présentons également les variations des débits utilisateurs avec le répartiteur proposé en comparaison avec le répartiteur de base, le Lowest-RTT-First.

#### 7.2 Topologie et scénarios pour la sélection des nœuds d'accès

La topologie utilisée pour la simulation est illustrée à la figure 7.1. Elle est composée de trois points d'accès WIFI (AP) et deux eNodeB LTE fournis par les cadres INET (Varga, 2016) et SIMULTE (Virdis, Stea, & Nardini, 2014), respectivement. Les zones de couverture de ces nœuds d'accès (AP, eNodeB) se chevauchent partiellement. Chaque nœud d'accès peut joindre un serveur à travers le réseau cœur de l'opérateur composé de routeurs (non représentés ici

pour simplicité). Les utilisateurs dans le réseau se connectent au serveur et transfèrent des données via les nœuds d'accès. Dans le scénario considéré, les utilisateurs téléchargent des données du serveur en utilisant des connexions TCP. Le tableau 7.1 montre les différents paramètres de transmission des données.

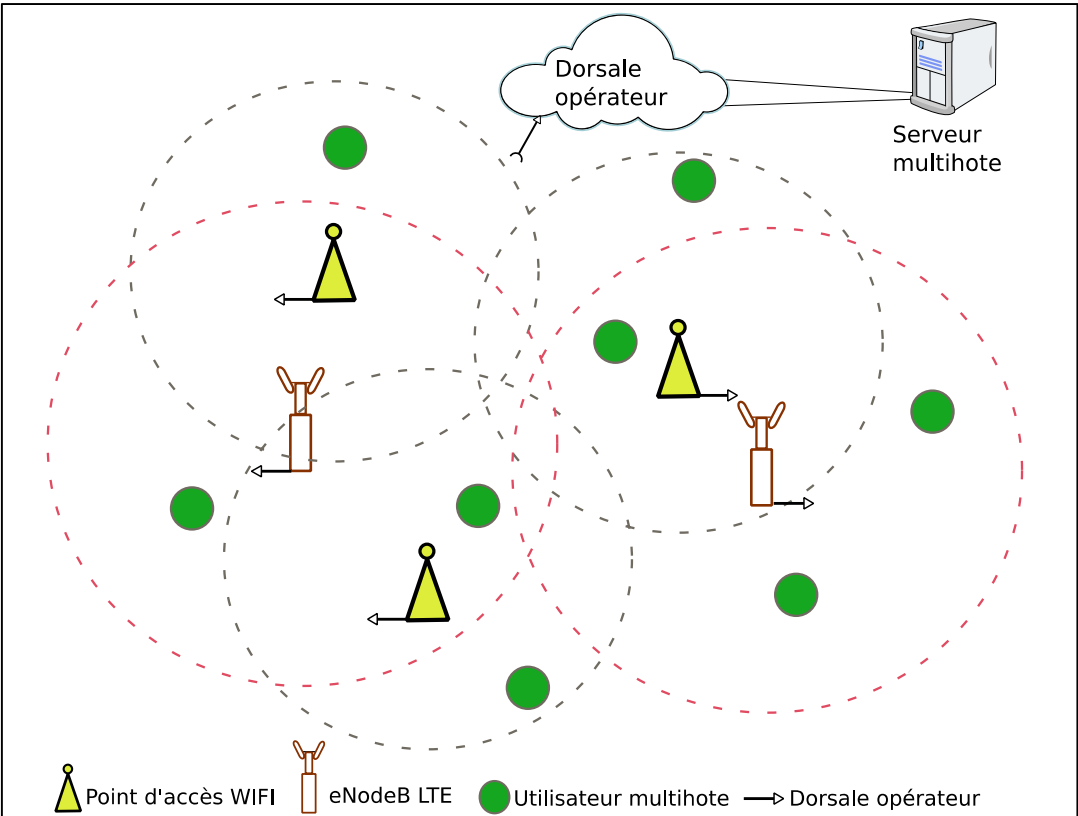


Figure 7.1 Vue schématique de la topologie pour la sélection des nœuds d'accès

Tableau 7.1 Paramètres de transfert des données

| Paramètre                                | Valeur                  |
|------------------------------------------|-------------------------|
| Intervalle de requête des paquets        | 5ms                     |
| Taille des paquets (requête utilisateur) | 536 Octets              |
| Taille des données (sortant du serveur)  | 2680 Octets par requête |
| Temps de simulation                      | 2000 s                  |

Avant de se connecter au serveur, chaque utilisateur sélectionne les meilleurs nœuds d'accès selon le modèle de sélection. Nous considérons deux scénarios. Dans le premier scénario, nous

utilisons un transfert sur un seul chemin tandis que dans le second scénario, nous transférons les données sur plusieurs chemins en activant le protocole MPTCP. Le but de ces deux scénarios est de montrer les bénéfices des méthodes de sélection pour les transferts par chemin unique et par multichemin. Nous comparons les performances de la sélection des nœuds d'accès par les deux modèles proposés, UFMDP et IUMDP avec celle basée sur le meilleur niveau de signal reçu, RSS, largement utilisée dans les équipements utilisateurs actuels.

### 7.3 Sélection des nœuds d'accès basée sur RSS

Dans la simulation, nous utilisons le modèle de propagation en espace libre, une dérivée de l'équation de Friis (Friis, 1946; Shaw, 2013), pour calculer la puissance du signal reçu. Cette puissance du signal reçu dépend de la distance entre le nœud d'accès et l'utilisateur et des puissances de transmission de l'utilisateur et du nœud d'accès. Ensuite, la puissance reçue est exprimée par :

$$P_r = \frac{P_t \times G_t \times G_r \times \lambda^2}{(4 \times \pi)^2 \times d^\alpha \times L} \quad (7.1)$$

avec les définitions suivantes :

$P_t, P_r$  : puissances de transmission et de réception

$G_t, G_r$  : gains des antennes de transmission et de réception

$\lambda$  : longueur d'onde du signal

$d$  : distance entre transmetteur et récepteur

$\alpha, L$  : coefficient de perte de chemin et facteur de perte du système

La sélection par le niveau de puissance de signal reçu est utilisée à cause de la relation entre le débit à l'arrivée et le rapport signal plus interférence sur bruit SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) démontrée par l'expression de capacité de Shannon comme dans (Xiaoxin & Chawla, 1999). Ce SINR noté par  $\gamma$  s'exprime de façon générale par :

$$SINR = \gamma = \frac{P}{I + N} \quad (7.2)$$

où  $P$  est la puissance du signal d'intérêt,  $I$  est la puissance de l'interférence (autres signaux dans le réseau) et  $N_{\text{est}}$  la puissance du bruit.

En communications numériques, voir dans (Proakis & Salehi, 2008), ce SINR s'exprime comme suit :

$$\gamma = \frac{R_b}{W} \frac{E_b}{I_0} \quad (7.3)$$

où  $R_b$  est le débit de transmission du signal,  $E_b$  l'énergie par bit au récepteur,  $W$  la largeur de bande du canal et  $I_0$  la densité de l'interférence plus le bruit. Le produit  $R_b \times E_b$  désigne le RSS. Nous pouvons donc voir que cette sélection de nœuds d'accès basée sur le RSS cherche à maximiser le débit physique reçu à l'interface. Cependant, cette méthode ne tient pas compte des pertes de paquets et des arrivées désordonnées de certains paquets à la couche transport. Or, ces deux effets influencent négativement le débit à l'arrivée à l'application. En plus, comme déjà évoqué, le débit n'est qu'un élément de QoS parmi d'autres.

#### 7.4 Paramètres pour la sélection des nœuds d'accès avec UFMDP et IUMDP

À partir des résultats des simulations, nous désirons voir comment varient les revenus de l'opérateur ainsi que les valeurs des métriques de QoS (ici le débit à l'arrivée et le délai de bout en bout). Pour cela, nous varions les taux d'arrivée des utilisateurs et les taux de service des nœuds d'accès. Le taux d'arrivée des utilisateurs représente la fréquence de connexion des utilisateurs au réseau et le taux de service des nœuds représente la durée de connexion des utilisateurs. Le taux d'arrivée des utilisateurs et le taux de service des nœuds sont reliés par la grandeur que nous désignons par charge du réseau exprimée comme suit :

$$\text{Charge réseau} = \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} \quad (7.4)$$

où  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont les taux d'arrivée des utilisateurs de classe 1 et classe 2, respectivement, et  $\mu_1$  et  $\mu_2$  représentent les taux de service pour les utilisateurs de classe 1 et classe 2,

respectivement. Cette charge de réseau exprime en fait le taux d'occupation du réseau par les utilisateurs. La charge du réseau est considérée à sa valeur nominale pour la valeur égale à 1 et pour les valeurs supérieures à 1, on dit que le réseau est surchargé.

#### 7.4.1 Évaluation de l'utilité de l'utilisateur

Nous commençons avec le calcul de l'utilité de l'utilisateur pour les critères sélectionnés. Pour chaque critère, le tableau 7.2 présente les valeurs minimales, moyennes et maximales demandées par l'utilisateur ainsi que les pondérations associées à chaque critère. Le tableau 7.3 présente les valeurs des critères offertes par les nœuds d'accès. Les débits de transfert des nœuds d'accès sont dérivés des valeurs nominales (optimales) des technologies radio, soit 54 Mbps pour les points d'accès WiFi 802.11g et 75 Mbps pour les eNodeB en considérant une bande passante de 20 MHz et un système d'antenne SISO (Single In Single Out). Les délais et les taux de pertes de paquets sont des exemples de valeurs pour les simulations. Ensuite, le calcul de l'utilité pour chaque critère utilise les valeurs des tableaux 7.2, 7.3 et (3.4). Notez que, dans les réseaux réels, les valeurs pour les critères de délai et des taux de perte de paquets proviennent de statistiques mesurées aux nœuds d'accès, tandis que les valeurs du débit de données physique maximal théorique pour l'émetteur dépendent de la technologie radio. Pour attribuer les poids aux critères, nous utilisons les arguments suivants. L'utilisateur privilégie le coût du service par rapport aux autres critères. Par conséquent, les préférences de critères sont dans l'ordre d'importance décroissant : coût, débit de données, délai, RSS, perte de paquets. De plus, pour ne pas négliger certains critères, nous limitons le poids de tout critère à une valeur inférieure à 0,5. Le problème avec contraintes résultant des déclarations ci-dessus est donné par :

$$\begin{aligned}
 w_{ct} + w_{dr} + w_{dl} + w_{rss} + w_{pl} &= 1 \quad \text{Sujet à:} \\
 w_{ct} &> w_{dr} > w_{dl} > w_{rss} > w_{pl} \\
 w_i &< 0.5, w_i \in \{w_{ct}, w_{dr}, w_{dl}, w_{rss}, w_{pl}\}
 \end{aligned} \tag{7.5}$$

où  $w_{ct}$ ,  $w_{dr}$ ,  $w_{dl}$ ,  $w_{rss}$  et  $w_{pl}$  sont les poids respectifs du coût, de débit de données, du délai, de RSS et du taux de perte de paquets. Les solutions de (7.5) donnent les poids des critères présentés dans le tableau 7.2.

Tableau 7.2 Valeurs demandées par les utilisateurs pour les critères

|                           | <b>Valeurs demandées par l'utilisateur :</b> |                             |
|---------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|
|                           | <b>min; moyenne; max / poids</b>             |                             |
| <b>Critère</b>            | <b>Utilisateur Classe 1</b>                  | <b>Utilisateur Classe 2</b> |
| Coût                      | 0; 4; 8 / 0,25                               | 0; 2,5; 5 / 0,28            |
| Débit de données (Mbps)   | 18; 36; 54 / 0,23                            | 12; 30; 48 / 0,23           |
| Délai (ms)                | 0; 5; 10 / 0,19                              | 0; 7,5; 15 / 0,19           |
| RSS (dBm)                 | -100; -60; -20 / 0,18                        | -100; -65; -30 / 0,17       |
| Taux perte de paquets (%) | 0; 2,5; 5 / 0,15                             | 0; 3; 6 / 0,13              |

Tableau 7.3 Valeurs offertes par les nœuds d'accès pour les critères

| <b>Critère / Nœuds d'accès</b>               | <b>AP1</b>                    | <b>AP2</b> | <b>AP3</b> | <b>eNodeB1</b> | <b>eNodeB2</b> |
|----------------------------------------------|-------------------------------|------------|------------|----------------|----------------|
| Coût classe 1                                | 3,4                           | 3          | 4          | 9,1            | 5,8            |
| Coût classe 2                                | 2.5                           | 1.5        | 2          | 8.8            | 4.2            |
| Débit de données<br>Maximum théorique (Mbps) | 54                            | 54         | 54         | 75             | 75             |
| Délai (ms)                                   | 12                            | 15         | 9          | 7              | 10             |
| RSS (dBm)                                    | Selon implémentation de (7.1) |            |            |                |                |
| Taux perte de paquets (%)                    | 5                             | 6          | 4,5        | 3              | 5              |

Pour le modèle IUMDP, les valeurs choisies de  $k$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\mathcal{T}_1$  et  $\mathcal{T}_2$  pour le calcul de la pénalité d'utilité de l'utilisateur sont répertoriées dans le tableau 7.4.

Tableau 7.4 Valeurs des constantes pour le calcul de la pénalité d'utilité de l'utilisateur

| Constante       | Valeur | Description                                            |
|-----------------|--------|--------------------------------------------------------|
| $k$             | 0,6    | Coefficient de récompense pour l'utilité nulle         |
| $k_1$           | 0,5    | Coefficient de récompense pour la zone de tolérance    |
| $k_2$           | 0,2    | Coefficient de récompense pour la zone de satisfaction |
| $\mathcal{T}_1$ | 0,5    | Seuil d'utilité pour la zone de tolérance              |
| $\mathcal{T}_2$ | 0,8    | Seuil d'utilité pour la zone de satisfaction           |

#### 7.4.2 Évaluation de l'utilité de l'opérateur

Pour le calcul des utilités de l'opérateur, nous modélisons chaque nœud d'accès par un système de file d'attente M/M/m/m avec perte, où  $m$  est la capacité du nœud d'accès avec les taux d'arrivée, de service et de récompense indiqués dans le tableau 7.5. Les paramètres de récompense pour les utilisateurs de chemin d'accès multiples sont définis avec les remises suivantes :  $\mathcal{D}=70\%$ ,  $\mathcal{d}=50\%$  et  $\mathcal{s}=30\%$ .

La politique de réduction devient comme suit :

- Utilisateur multichemin immédiat : 50% de réduction sur le second chemin quand il utilise 2 chemins et 70% de réduction sur le 3<sup>e</sup> chemin quand il utilise 3 chemins.
- Utilisateur multichemin séquentiel : 30% de réduction sur chaque chemin supplémentaire.

Tableau 7.5 Paramètres de trafic des nœuds d'accès

| Paramètre/Nœuds d'accès                                                                | AP1         | AP2 | AP3 | eNodeB1 | eNodeB2 |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----|-----|---------|---------|
| Capacité du nœud d'accès                                                               | 6           | 7   | 4   | 10      | 13      |
| Taux d'arrivée utilisateur classe 1 $\lambda_1$                                        | 0,04 à 0,34 |     |     |         |         |
| Taux de service utilisateur classe 1 $\mu_1$                                           | 0,2         |     |     |         |         |
| Taux de récompense utilisateur classe 1 pour chemin unique $r_{1\_base}$               | 4           | 4   | 4   | 7       | 7       |
| Taux de récompense utilisateur classe 1 multichemin immédiat $r_{1\_imme}$ (2 chemins) | 6           | 6   | 6   | 10,5    | 10,5    |
| Taux d'arrivée utilisateur classe 2 $\lambda_2$                                        | 0,03 à 0,33 |     |     |         |         |
| Taux de service utilisateur classe 2 $\mu_2$                                           | 0,3         |     |     |         |         |
| Taux de récompense utilisateur classe 2 pour chemin unique $r_{2\_base}$               | 3           | 3   | 3   | 5       | 5       |
| Taux de récompense utilisateur classe 2 multichemin immédiat $r_{2\_imme}$ (2 chemins) | 4,5         | 4,5 | 4,5 | 7,5     | 7,5     |

## 7.5 Topologie et scénarios pour le test du répartiteur des flux aux sous-sessions

Le réseau pour tester le répartiteur est présenté à la figure 7.2. Il est composé d'un serveur multihôte, d'utilisateurs multichemin, d'utilisateurs à chemin unique et de points d'accès WIFI. Pendant la simulation, les utilisateurs se connectent au serveur via les points d'accès pour télécharger des données. Les utilisateurs à chemin unique se connectent à un seul point d'accès, tandis que les utilisateurs multichemin utilisent les deux points d'accès. Tous les utilisateurs commencent leurs transferts de données en utilisant un chemin. Les utilisateurs 3 et 5 sont connectés en tout temps au point d'accès AP1 qui utilise le chemin 1 et l'utilisateur 4 est connecté en tout temps au point d'accès AP2 qui utilise le chemin 2. Les utilisateurs 1 et 2 commencent leurs transferts par le point d'accès AP2 et aux temps indiqués dans les résultats de la simulation ils passent en multichemin en ajoutant le chemin 1 pour leurs transferts de données. Le tableau 7.6 donne les détails des paramètres de la simulation.

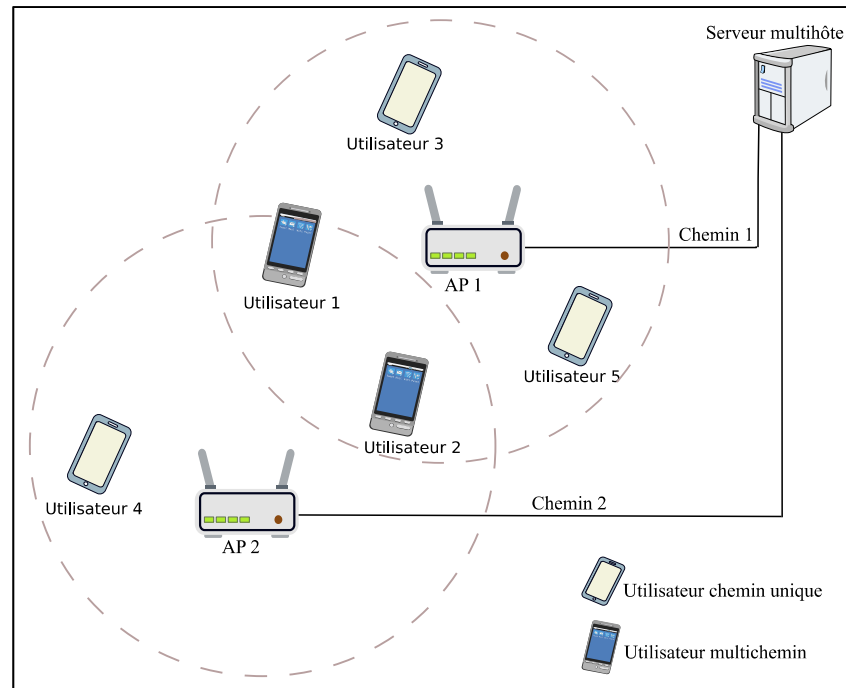


Figure 7.2 Topologie du réseau pour le test du répartiteur

Le débit global de paquets de données arrivant au répartiteur est égal à la somme du débit de demande de données des utilisateurs individuels. Ici, nous utilisons le même taux de requête pour tous les utilisateurs soit  $\lambda_u$ . Les capacités maximales des files d'attente sont liées au MSS (Maximum Segment Size) du TCP par la relation : capacité maximale = MSS \* 14. Nous utilisons la valeur de MSS par défaut, soit MSS = 536 octets. Ce qui donne une capacité maximale de 7504 octets.

Tableau 7.6 Paramètres de simulation pour tester le répartiteur

| Paramètre                                      | Valeur     |
|------------------------------------------------|------------|
| Taux d'arrivée des utilisateurs $\lambda_u$    | 3          |
| Délai sur le chemin 1                          | 500 us     |
| Délai sur le chemin 2                          | 50000 us   |
| Taux de perte de paquets sur le chemin 1       | 0.001      |
| Taux de perte de paquets sur le chemin 2       | 0.002      |
| TCP MSS                                        | 536 Octets |
| Taille des paquets de données des utilisateurs | 300 Octets |
| Durée de la simulation                         | 1500 s     |

## 7.6 Résultats numériques, analyses et discussion

Dans cette section, nous présentons les revenus de l'opérateur du réseau, le débit moyen des données des utilisateurs, le délai de bout en bout sur les paquets de données des utilisateurs et les probabilités de blocage des utilisateurs en fonction de la charge du réseau pour les modèles UFMDP, IUMDP et RSS. Nous présentons également la sensibilité des probabilités de blocage des utilisateurs aux nœuds d'accès aux paramètres de récompense. Nous avons considéré les transferts de données par chemin unique et par multichemin. Les valeurs des taux d'arrivée, des taux de service et des paramètres de récompense sont celles présentées dans le tableau 7.5. Pour UFMDP, les poids pour l'agrégation des utilités sont de 0,5 chacun pour l'opérateur et l'utilisateur, mais nous présentons également la sensibilité des revenus de l'opérateur aux différentes valeurs des poids d'agrégation. Nous rappelons que la topologie utilisée est celle de la Figure 7.1. Les valeurs présentées dans les graphiques sont des moyennes de 10 simulations avec différentes graines aléatoires (nombres pour le générateur de nombres pseudo-aléatoires). Les utilisateurs sont positionnés aléatoirement dans le réseau. Notons qu'une simulation représente en fait plusieurs simulations avec une valeur de graine différente (ex. pour le graphique de revenu de l'opérateur pour UFMDP, on utilise 10 graines aléatoires avec 8 valeurs différentes de charge du réseau, donc 80 simulations).

### 7.6.1 Revenus de l'opérateur

La figure 7.3 présente les revenus de l'opérateur de réseau en fonction de la charge du réseau. Nous supposons que les paramètres de récompense de connexion ont une valeur monétaire. Le calcul du revenu de l'opérateur utilise (3.8). Nous constatons que pour chaque charge du réseau, les revenus de l'opérateur sont plus grands avec le multichemin qu'avec le chemin unique et que UFMDP et IUMDP ont des revenus plus grands que ceux de RSS. Dans les conditions de surcharge (charge > 1), les revenus sont saturés pour tous les modèles en raison des capacités limitées des nœuds d'accès, bien qu'avec IUMDP, une légère augmentation soit encore perceptible. Nous notons aussi que IUMDP donne des revenus plus élevés que ceux de UFMDP. Ceci s'explique par le fait que, bien que les deux modèles utilisent l'optimisation

basée sur MDP, dans le cas de UFMDP, le résultat de cette optimisation n'a qu'un poids partiel dans la sélection du nœud d'accès final (voir agrégation des utilités dans la section 3.2), tandis qu'avec IUMDP, la sélection est entièrement basée sur le résultat de l'optimisation.

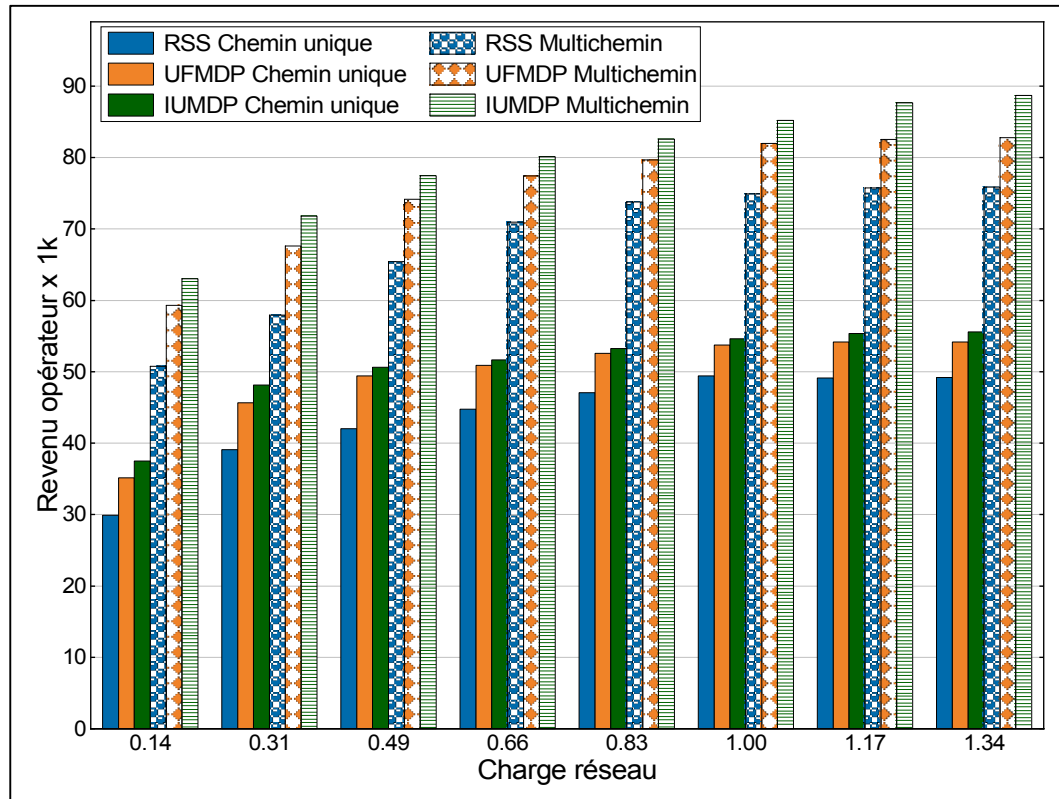


Figure 7.3 Revenus de l'opérateur en fonction de la charge du réseau

Étant donné que les revenus de l'opérateur présentés à la figure 7.3 pour le modèle IUMDP sont calculés à partir de (3.8), cela signifie que la pénalité utilisée dans ce modèle n'a pas de valeur monétaire et est traitée uniquement comme paramètre d'optimisation de la sélection de nœuds. Pour donner une indication de l'effet de la pénalité, dans la figure 7.4 nous comparons les revenus de l'opérateur de réseau calculés à partir de (3.8), pour les modèles UFMDP et IUMDP, avec les revenus de l'opérateur calculés pour le modèle IUMDP basée sur (4.3) dans laquelle la pénalité est considérée avoir une valeur monétaire. Notons que, dans ce dernier cas, le revenu avec IUMDP diminue dans les conditions de surcharge, ce qui est causé par la dégradation des paramètres de qualité de service qui à leur tour augmente la pénalité appliquée

au taux de revenu. Nous remarquons également que l'utilisation du transfert par multichemin procure des revenus nettement supérieurs à ceux offerts par le transfert par chemin unique.

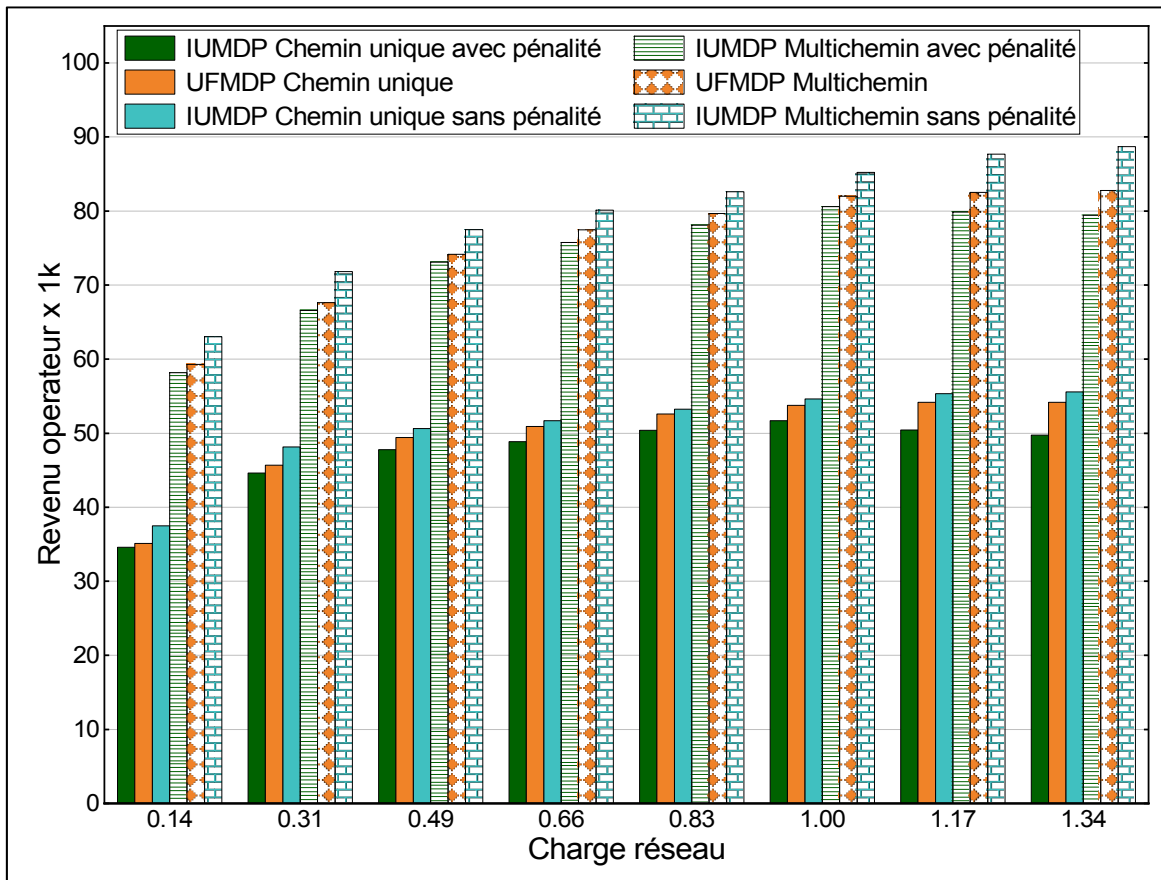


Figure 7.4 Comparaison des revenus de l'opérateur pour IUMDP et UFMDP

Pour donner une évaluation plus précise de l'augmentation du revenu dans les différents cas, nous présentons au tableau 7.7 les pourcentages d'augmentation issus de comparaisons par paires des revenus moyens de l'opérateur. Pour les scénarios testés, les résultats montrent que la contribution la plus importante à la croissance des revenus de l'opérateur est due à l'utilisation de transferts sur trajets multiples (50 à 70% dans les scénarios considérés). En comparant les modèles proposés, UFMDP et IUMDP, avec le modèle RSS de référence, le gain sur le revenu est de l'ordre de 11 à 17%.

Tableau 7.7 Comparaison par paires des revenus de l'opérateur

|   | <b>Paire</b>                            | <b>Augmentation (+) ou diminution (-) (%)</b> |
|---|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1 | UFMDP Multichemin - RSS Chemin unique   | +72.7                                         |
| 2 | UFMDP Multichemin - RSS Multichemin     | +11                                           |
| 3 | UFMDP Multichemin - UFMDP Chemin unique | +53.0                                         |
| 4 | UFMDP Chemin unique - RSS Chemin unique | +12.9                                         |
| 5 | IUMDP Multichemin - RSS Chemin unique   | +81.6                                         |
| 6 | IUMDP Multichemin - RSS Multichemin     | +16.7                                         |
| 7 | IUMDP Multichemin - IUMDP Chemin unique | +56.5                                         |
| 8 | IUMDP Chemin unique - RSS Chemin unique | +16.0                                         |

### 7.6.2 Débits de réception pour les utilisateurs

Dans la figure 7.5, nous montrons le débit moyen des données reçues par les utilisateurs par rapport à la charge du réseau. Le débit correspond à la quantité de données par unité de temps reçue par l'application. Notez que les données retransmises ainsi que les données reçues dans le désordre dans la couche de transport ne sont pas prises en compte dans l'évaluation du débit. Comme on pouvait s'y attendre, les résultats indiquent que l'utilisation de MPTCP avec n'importe quel modèle de sélection améliore le débit par rapport au cas à un seul chemin. À mesure que la charge du réseau augmente, le débit moyen diminue en raison de la limite de capacité du réseau, de l'augmentation des pertes de paquets due à la congestion ainsi que du retard sur les paquets transférés. Nous pouvons également noter que RSS a les valeurs de débit plus élevées pour les charges de réseau faibles et perd cette efficacité lorsque le réseau est surchargé (charge > 1). Cela peut s'expliquer par deux facteurs. Premièrement, même dans les cas où le réseau est moins chargé, le blocage de la demande des utilisateurs est nettement plus élevé avec RSS, ce qui donne plus de bande passante par demande acceptée. Deuxièmement, dans le modèle RSS, la sélection du nœud d'accès dépend de la distance qui le sépare de l'utilisateur. Comme dans nos scénarios, les utilisateurs sont répartis uniformément dans la zone, la probabilité qu'un grand nombre d'entre eux choisissent les mêmes nœuds d'accès est

faible pour les réseaux moins chargés, ce qui se traduit par un débit plus élevé. Pour les modèles UFMDP et IUMDP, les utilisateurs sont plus susceptibles de choisir les mêmes nœuds d'accès si ces derniers génèrent des revenus élevés pour l'opérateur. La comparaison des modèles IUMDP et UFMDP montre que le premier se comporte bien pour des charges élevées, car dans ce cas, le débit, qui fait partie de l'utilité des utilisateurs, est pris en compte dans la maximisation des revenus de l'opérateur.

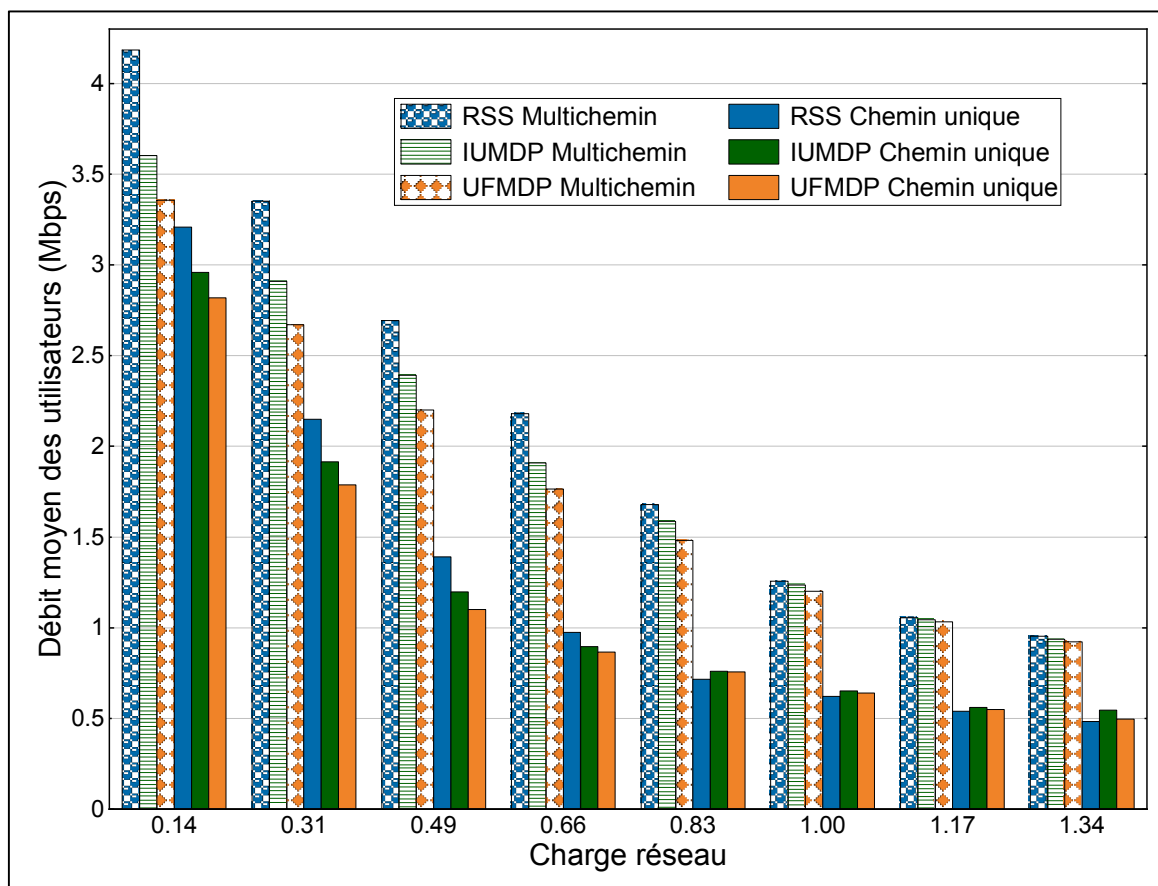


Figure 7.5 Débits moyens des utilisateurs en fonction de la charge du réseau

Le tableau 7.8 indique les pourcentages d'augmentation issus de comparaisons par paires sur les débits moyens des utilisateurs.

Tableau 7.8 Comparaison par paires des débits moyens des utilisateurs

|    | <b>Paire</b>                            | <b>Augmentation (+) ou diminution (-) (%)</b> |
|----|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1  | RSS Multichemin - UFMDP Chemin unique   | +92.5                                         |
| 2  | RSS Multichemin - IUMDP Chemin unique   | +83                                           |
| 3  | RSS Multichemin - RSS Chemin unique     | +72.2                                         |
| 4  | RSS Multichemin - UFMDP Multichemin     | +15.7                                         |
| 5  | IUMDP Multichemin - IUMDP Chemin unique | +64.7                                         |
| 6  | UFMDP Multichemin - UFMDP Chemin unique | +62.5                                         |
| 7  | IUMDP Multichemin - RSS Chemin unique   | +54.9                                         |
| 8  | UFMDP Multichemin - RSS Chemin unique   | +45.1                                         |
| 9  | RSS Chemin unique - UFMDP Chemin unique | +10.6                                         |
| 10 | RSS Multichemin - IUMDP Multichemin     | +10                                           |
| 11 | RSS Chemin unique - IUMDP Chemin unique | +5.9                                          |

Les résultats montrent que l'utilisation de l'option multichemin augmente considérablement le débit (45 à 90% dans les scénarios envisagés). C'est en effet l'un des principaux objectifs de la conception du protocole MPTCP. Pour mieux comprendre les variations du débit des utilisateurs, la figure 7.6 présente la répartition du débit utilisateur pour un échantillon de 50 valeurs, ainsi que les écarts-types et les moyennes géométriques pour chaque modèle de sélection pour différentes charges du réseau. Puisque la moyenne arithmétique est très sensible aux valeurs extrêmes et aux valeurs aberrantes dans les séries de données, il est judicieux d'analyser aussi la moyenne géométrique. L'analyse des résultats présentés à la figure 7.6 montre que IUMDP et UFMDP ont un meilleur comportement pour les charges de réseau élevées (à partir de 0,83) avec une dispersion plus faible des valeurs de débit reçues par les utilisateurs. Ceci est corroboré par leurs écarts-types plus petits, leurs moyennes géométriques plus élevées et leurs plages interquartiles plus courtes (boîtes rectangulaires sur la figure).

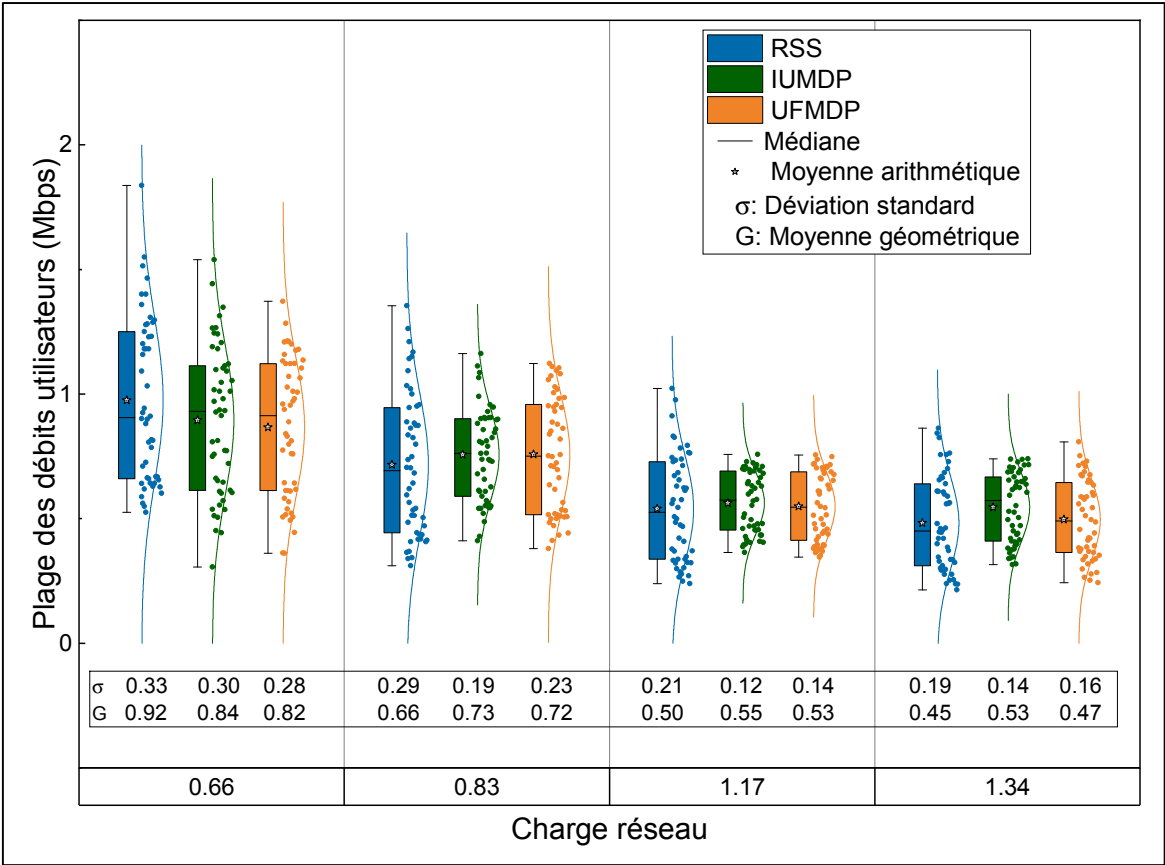


Figure 7.6 Distribution des débits utilisateurs pour certaines charges du réseau

Les revenus de l'opérateur et le débit moyen des utilisateurs pour UFMDP présentés aux figures 7.3, 7.4 et 7.5 sont mesurés pour les poids d'utilité de l'opérateur et des utilisateurs de 0,5 chacun. Dans la figure 7.7, nous présentons la sensibilité de la performance de ces métriques aux modifications des poids. En particulier, la figure 7.7 a) montre les revenus de l'opérateur pour les poids d'utilité de l'opérateur variant de 0,1 à 0,8 pour différentes charges du réseau et la figure 7.7 b) montre le débit moyen des utilisateurs pour les mêmes poids et charges du réseau. Notez que lorsque le poids de l'utilité de l'opérateur augmente, le poids de l'utilité de l'utilisateur diminue, car la somme de ces deux poids est toujours égale à 1.

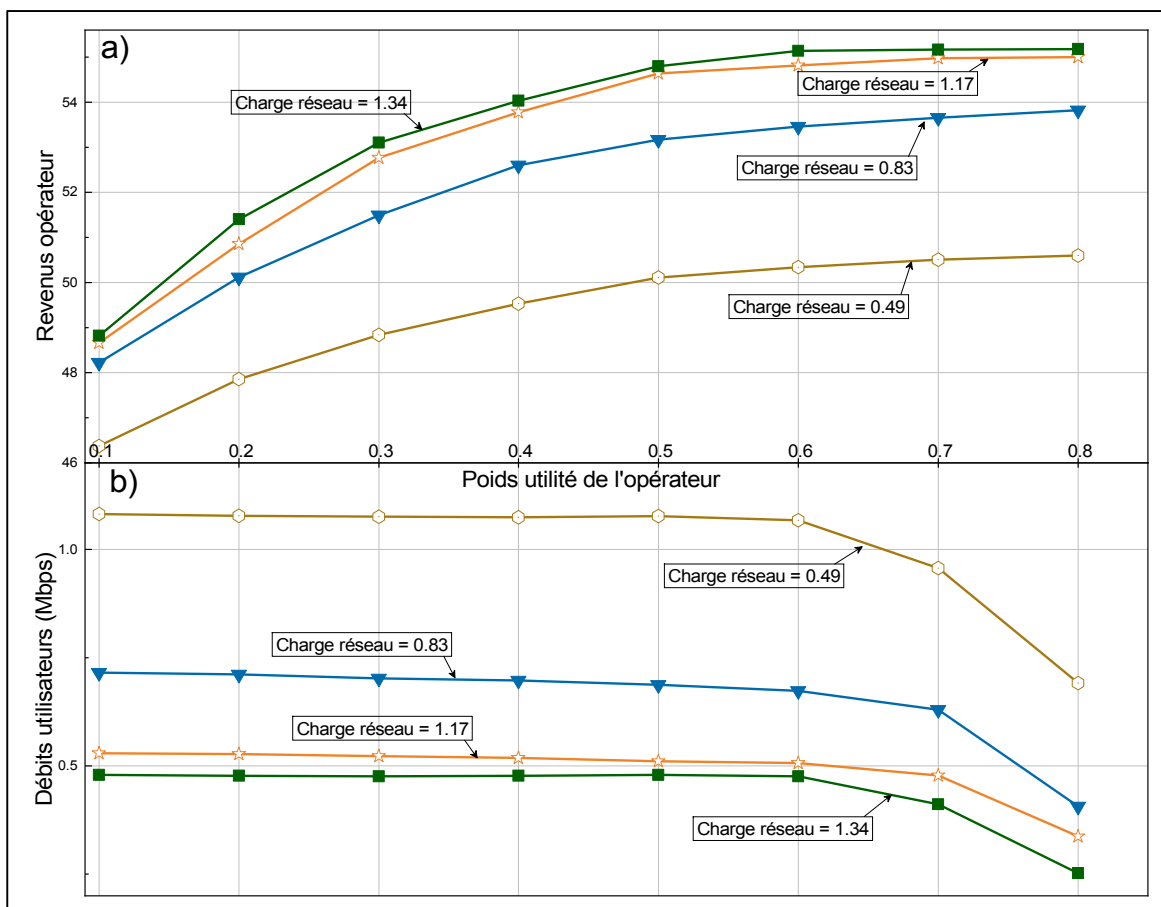


Figure 7.7 Influence des poids des utilités pour UFMDP:  
a) variation des revenus en fonction du poids de l'utilité  
b) variation des débits en fonction du poids de l'utilité

Les résultats montrent que les revenus de l'opérateur augmentent systématiquement avec la croissance du poids de l'utilité de l'opérateur jusqu'à ce que le poids atteigne une valeur d'environ 0,6. Pour les utilisateurs pour lesquels le poids de l'utilité diminue, le débit diminue lentement jusqu'à ce que le poids utilité de l'opérateur atteigne 0,6. Pour les valeurs de poids supérieures à 0,6, l'augmentation du revenu de l'opérateur devient très faible, tandis que les utilisateurs subissent une diminution importante du débit. Par conséquent, il est important de gérer judicieusement l'attribution des poids des utilités pour utiliser efficacement UFMDP.

### 7.6.3 Délais de bout en bout sur les données des utilisateurs

La figure 7.8 présente les délais de bout en bout moyens des utilisateurs en fonction de la charge du réseau. Le délai de bout en bout est mesuré dans la couche transport et ne prend pas en compte les paquets retransmis. Nous observons sur la figure 7.8 que les modèles UFMDP et IUMDP fournissent des délais nettement inférieurs au modèle RSS. Ces délais de bout en bout augmentent avec la charge du réseau pour tous les modèles. De plus, pour tous les modèles de sélection, les transferts par multichemin ont des délais de bout en bout légèrement supérieurs à ceux des transferts par chemin unique, en particulier pour des charges plus faibles. Cela peut s'expliquer par le problème de blocage en tête de ligne (Scharf & Kiesel, 2007), (Paasch et al., 2014) qui est causé par la différence de délais entre les chemins utilisés. Les données arrivant par le chemin le plus rapide doivent attendre les données arrivant par l'autre chemin pour être réordonnées avant d'être envoyées à la couche d'application.

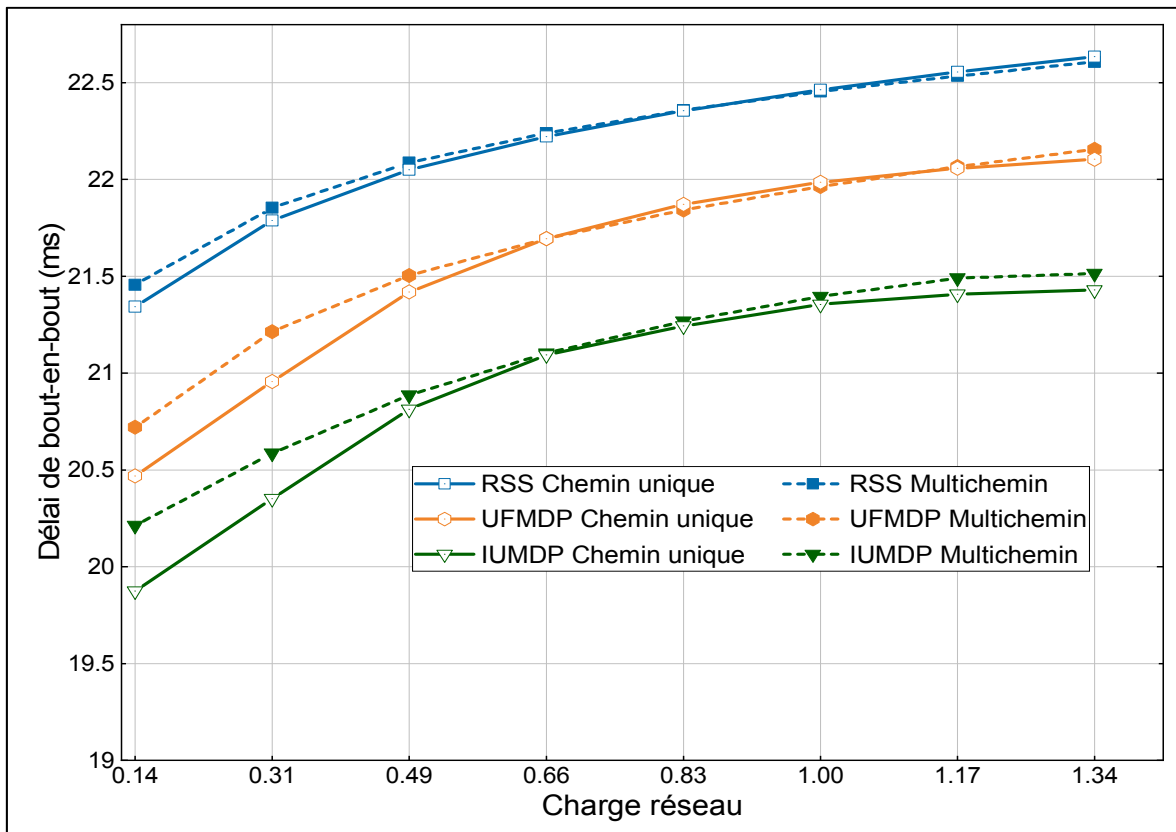


Figure 7.8 Délais moyens des utilisateurs en fonction de la charge du réseau

Dans le tableau 7.9 ci-dessous, nous faisons les comparaisons par paires des délais moyens. Il ressort de l'analyse de ce tableau que c'est l'utilisation des modèles de sélection de nœuds d'accès UFMDP et IUMDP qui améliore les délais ; baisse des délais de 2.4 à 2.7% avec UFMDP et de 5 à 5.5% avec IUMDP.

Tableau 7.9 Comparaison par paires des délais moyens des utilisateurs

|   | <b>Paire</b>                             | <b>Augmentation (+) ou diminution (-) (%)</b> |
|---|------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1 | UFMDP Multichemin vs RSS Chemin unique   | -2.4                                          |
| 2 | UFMDP Multichemin vs RSS Multichemin     | -2.5                                          |
| 3 | UFMDP Chemin unique vs RSS Chemin unique | -2.7                                          |
| 4 | UFMDP Multichemin vs UFMDP Chemin unique | +0.3                                          |
| 5 | IUMDP Multichemin vs RSS Chemin unique   | -5                                            |
| 6 | IUMDP Multichemin vs RSS Multichemin     | -5.2                                          |
| 7 | IUMDP Chemin unique vs RSS Chemin unique | -5.5                                          |
| 8 | IUMDP Multichemin vs IUMDP Chemin unique | +0.5                                          |

#### 7.6.4 Probabilités de blocage des utilisateurs

La probabilité de blocage est un paramètre important dans les réseaux de télécommunication, car des valeurs élevées de probabilité de blocage peuvent entraîner la frustration des utilisateurs. En outre, elle permet d'évaluer la répartition des utilisateurs aux nœuds d'accès. Nous estimons la probabilité de blocage par le rapport du nombre de demandes de connexion rejetées sur le nombre total de demandes de connexion. La figure 7.9 montre les probabilités de blocage pour différentes charges du réseau pour les différents modèles de sélection de nœuds d'accès. Nous pouvons remarquer que la probabilité de blocage augmente lentement avec la charge du réseau pour tous les modèles de sélection de nœuds jusqu'à ce que la charge du réseau atteigne des valeurs autour de 1, après quoi l'augmentation devient plus significative pour les réseaux surchargés (charge >1). Nous pouvons également observer que les modèles IUMDP et UFMDP ont des probabilités de blocage considérablement inférieures à celles de RSS. Cela est dû au fait que les algorithmes basés sur MDP ont tendance à éviter les nœuds d'accès déjà encombrés dans le but de maximiser le revenu de l'opérateur, alors que dans le

cas de RSS, le choix du nœud d'accès est principalement lié à la distance entre les nœuds d'accès et l'utilisateur. Comme on pouvait s'y attendre, les probabilités de blocage pour les cas de trajets multiples sont légèrement plus élevées pour tous les modèles de sélection parce que l'utilisation du multichemin implique une utilisation accrue des ressources disponibles (cela est équivalent à augmenter le nombre d'utilisateurs dans le réseau).

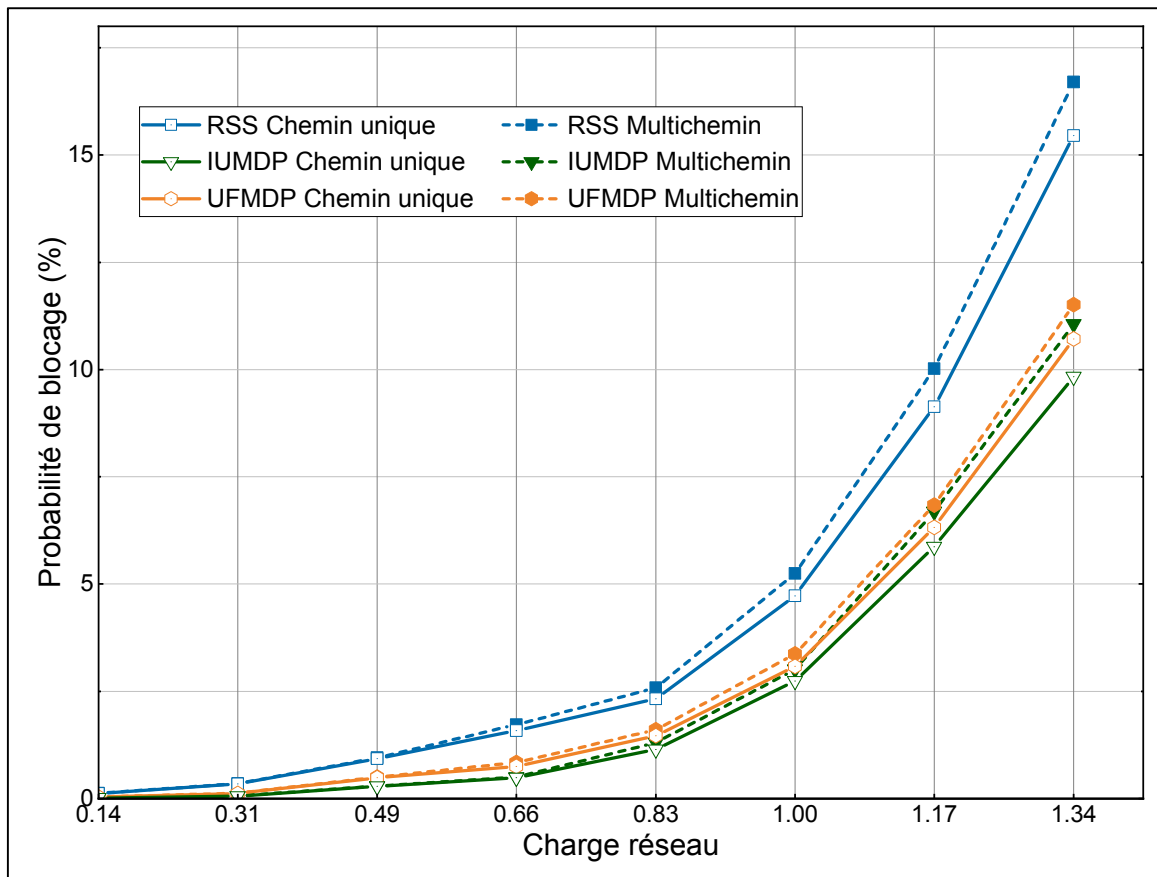


Figure 7.9 Probabilités de blocage des utilisateurs en fonction de la charge du réseau

Les probabilités de blocage fournies sur la figure 7.9 pour chaque modèle de sélection de nœuds d'accès sont les probabilités combinées des deux classes d'utilisateurs. Dans ce qui suit, nous faisons une analyse de l'effet des valeurs des paramètres de récompense sur les probabilités de blocage pour les différentes classes d'utilisateurs et pour les différents nœuds d'accès. La figure 7.10 montre les probabilités de blocage pour les deux classes d'utilisateurs et pour quatre charges de réseau (2 charges  $<1$  et 2 charges  $>1$ ). Nous constatons que la classe

d'utilisateurs avec le plus grand paramètre de récompense est moins bloquée et que les différences entre les probabilités de blocage pour les différentes classes d'utilisateurs sont plus grandes pour les réseaux surchargés. Notez que le paramètre de récompense de l'utilisateur de classe 1 est supérieur à celui de l'utilisateur de classe 2 (tableau 7.5). Pour les charges inférieures à 0.66, nous avons trouvé que les différences entre les probabilités de blocage des deux classes sont très faibles (0.2 à 0.4 %).

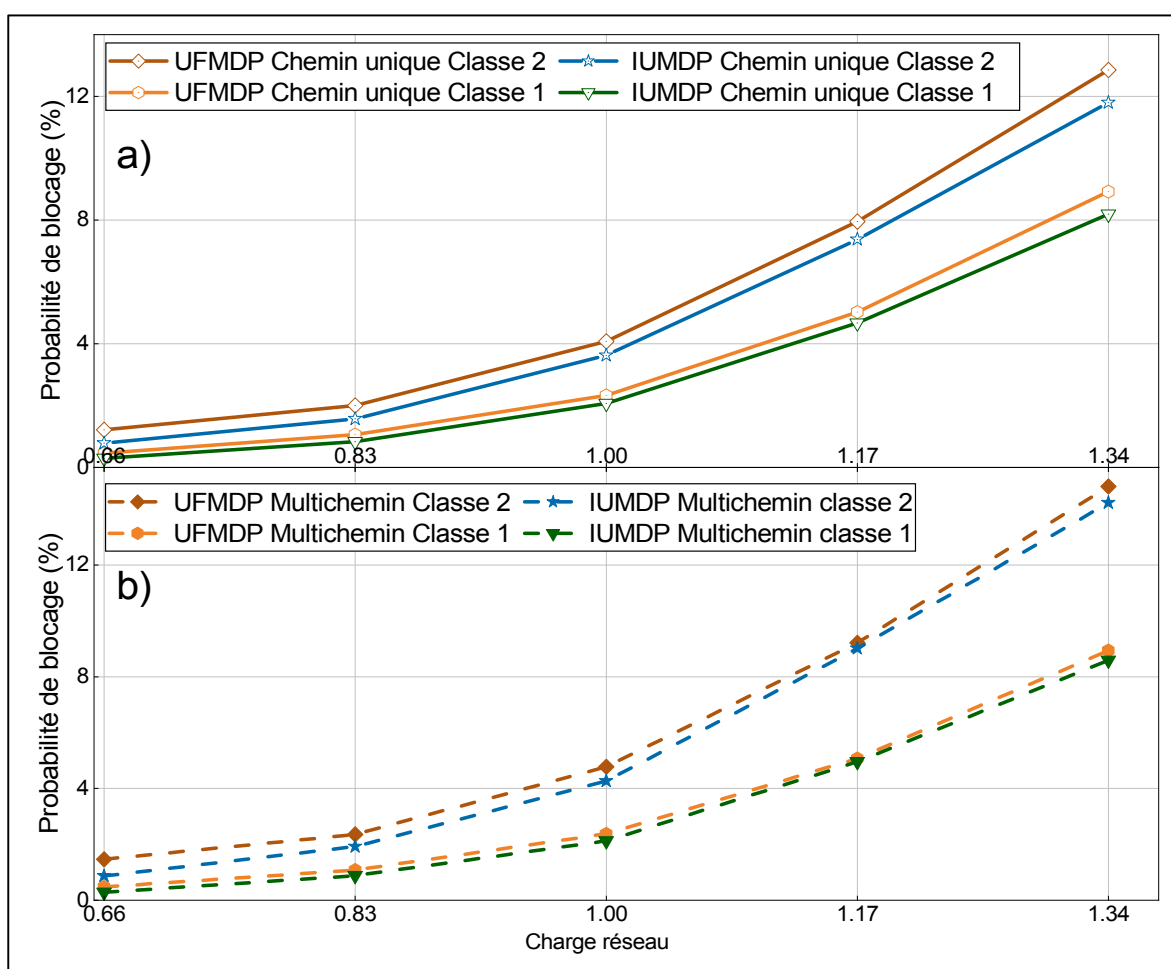


Figure 7.10 Probabilités de blocage par classe d'utilisateur en fonction de la charge du réseau:  
a) pour transfert avec chemin unique  
b) pour transfert avec multichemin

Les figures 7.11 et 7.12 montrent les variations des probabilités de blocage des classes d'utilisateurs en fonction des rapports entre leurs paramètres de récompense  $r_{1\_base}/r_{2\_base}$  (avec  $r_{1\_base}$  et  $r_{2\_base}$  les paramètres de récompense des utilisateurs de classe 1 et de classe 2 respectivement) pour UFMDP et IUMDP. Nous avons traité trois charges de réseau (1 charge  $< 1$  et 2 charges  $> 1$ ).

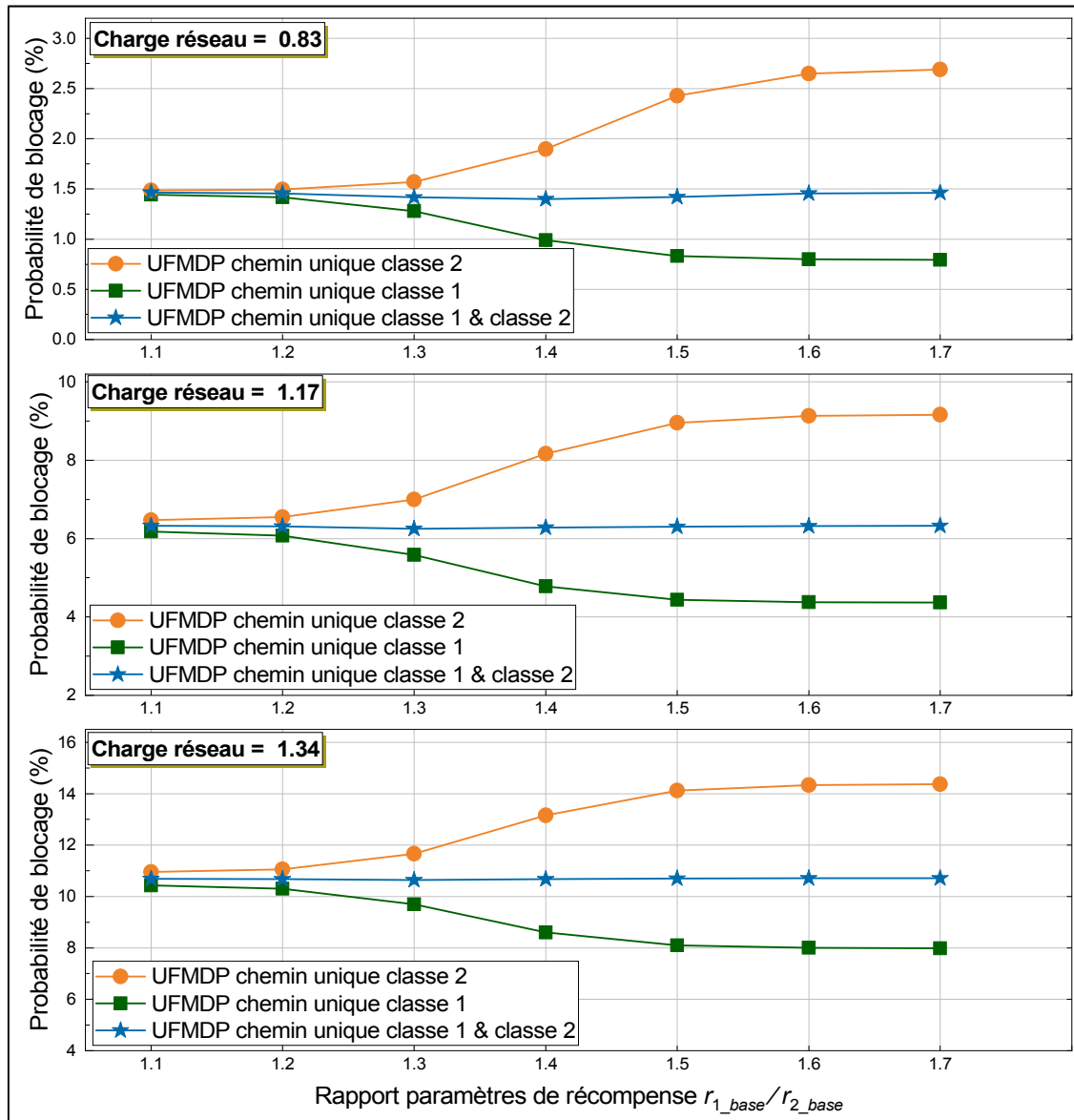


Figure 7.11 Variation des probabilités de blocage des classes d'utilisateurs en fonction du rapport entre les paramètres de récompense avec UFMDP

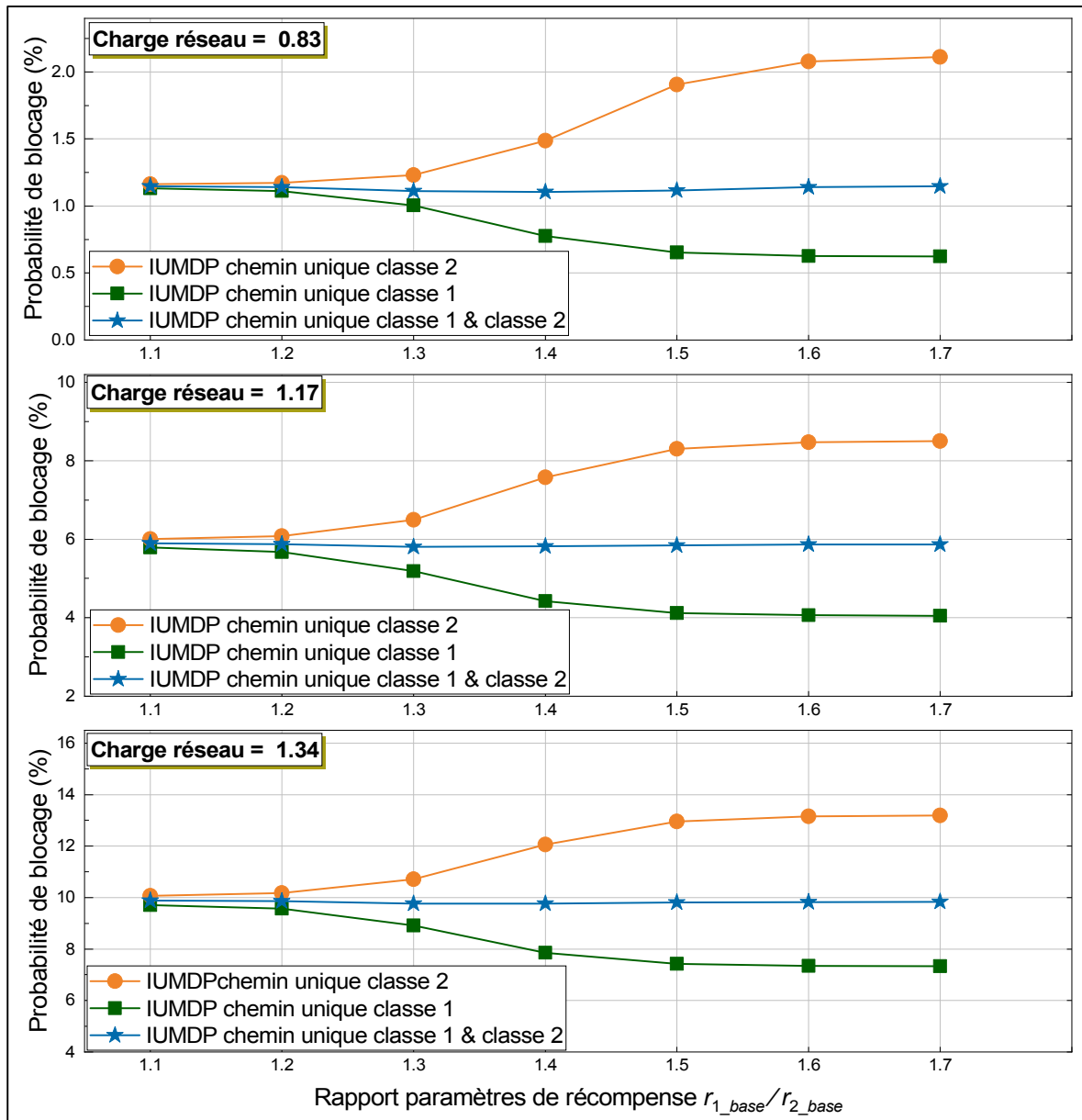


Figure 7.12 Variation des probabilités de blocage des classes d'utilisateurs en fonction du rapport entre les paramètres de récompense avec IUMDP

Pour toutes ces charges et tous les modèles de sélection de nœuds d'accès, l'écart entre les probabilités de blocage des classes d'utilisateurs augmente avec le rapport entre les paramètres de récompense des classes d'utilisateurs. Cet accroissement entre les probabilités de blocage des classes d'utilisateurs est faible pour les petits rapports de paramètres de récompense puis devient grand pour les rapports de paramètres de récompense moyens et se termine par une

stabilité de l'écart entre les probabilités de blocage. Nous notons aussi que les probabilités de blocage pour les deux classes d'utilisateurs combinées sont indépendantes des rapports entre les paramètres de récompense des classes d'utilisateurs pour toutes les charges de réseau et les deux modèles UFMDP et IUMDP.

Les figures 7.13 et 7.14 montrent la sensibilité des distributions des connexions totales acceptées aux nœuds d'accès en fonction du rapport entre les paramètres de récompense attribués aux utilisateurs pour l'utilisation des différents nœuds d'accès regroupés selon les technologies radio (point d'accès et eNodeB) pour UFMDP et IUMDP, respectivement. Dans chaque figure nous avons ajouté la sensibilité de la provenance des revenus de l'opérateur en fonction du rapport entre les paramètres de récompense attribués aux utilisateurs pour l'utilisation des différents nœuds d'accès. En notant par  $r_{AP}$  le paramètre de récompense pour l'utilisation du point d'accès et par  $r_{eNodeB}$  le paramètre de récompense pour l'utilisation de l'eNodeB, nous avons considéré 7 cas (3 cas avec  $r_{eNodeB} > r_{AP}$ , 3 cas avec  $r_{eNodeB} < r_{AP}$  et le cas  $r_{eNodeB} = r_{AP}$ ). Ici, les mesures concernent les utilisateurs toutes classes confondues. Les résultats indiquent que le type de nœud d'accès (AP ou eNodeB) pour lequel les utilisateurs ont le plus grand paramètre de récompense admet le plus de connexions (figures 7.13 a) et 7.14 a) ). Concomitamment, ce même type de nœud d'accès fournit la plus grande partie du revenu de l'opérateur (figures 7.13 b) et 7.14 b) ). Les courbes pour les connexions acceptées aux deux technologies combinées sont presque stables, quels que soient les rapports  $r_{AP}/r_{eNodeB}$ . Les courbes pour les revenus de l'opérateur pour les deux technologies combinées montrent que les rapports  $r_{AP}/r_{eNodeB}$  ont une influence sur le revenu total de l'opérateur. Ce revenu total atteint les plus grandes valeurs pour les rapports  $r_{AP}/r_{eNodeB}$  autour de 1, car pour ce rapport, on exploite le plein potentiel des nœuds d'accès par la distributions efficace des utilisateurs à ces noeuds.

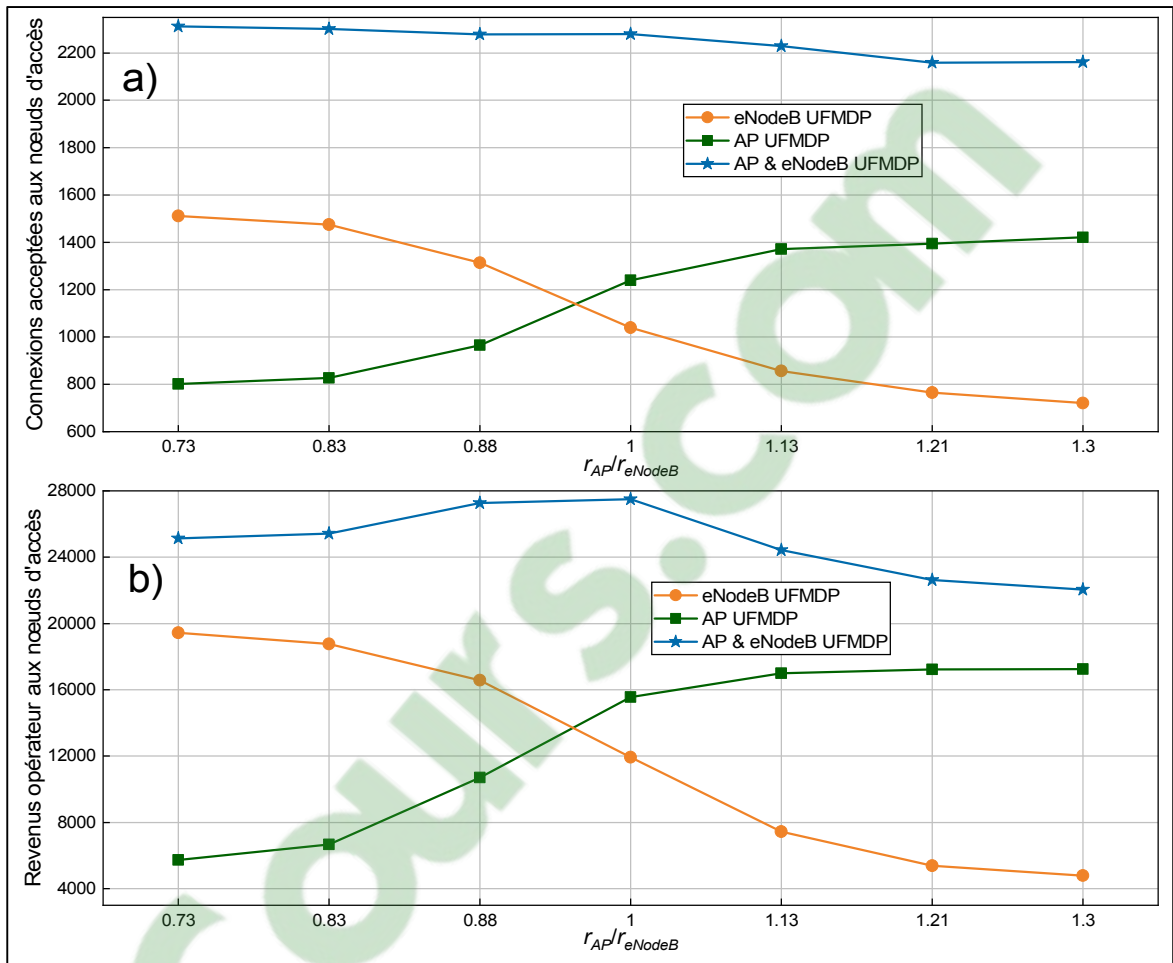


Figure 7.13 a) Connexions acceptées en fonction du rapport des paramètres de récompense avec UFMDP

b) Revenus provenant des nœuds en fonction du rapport des paramètres de récompense avec UFMDP

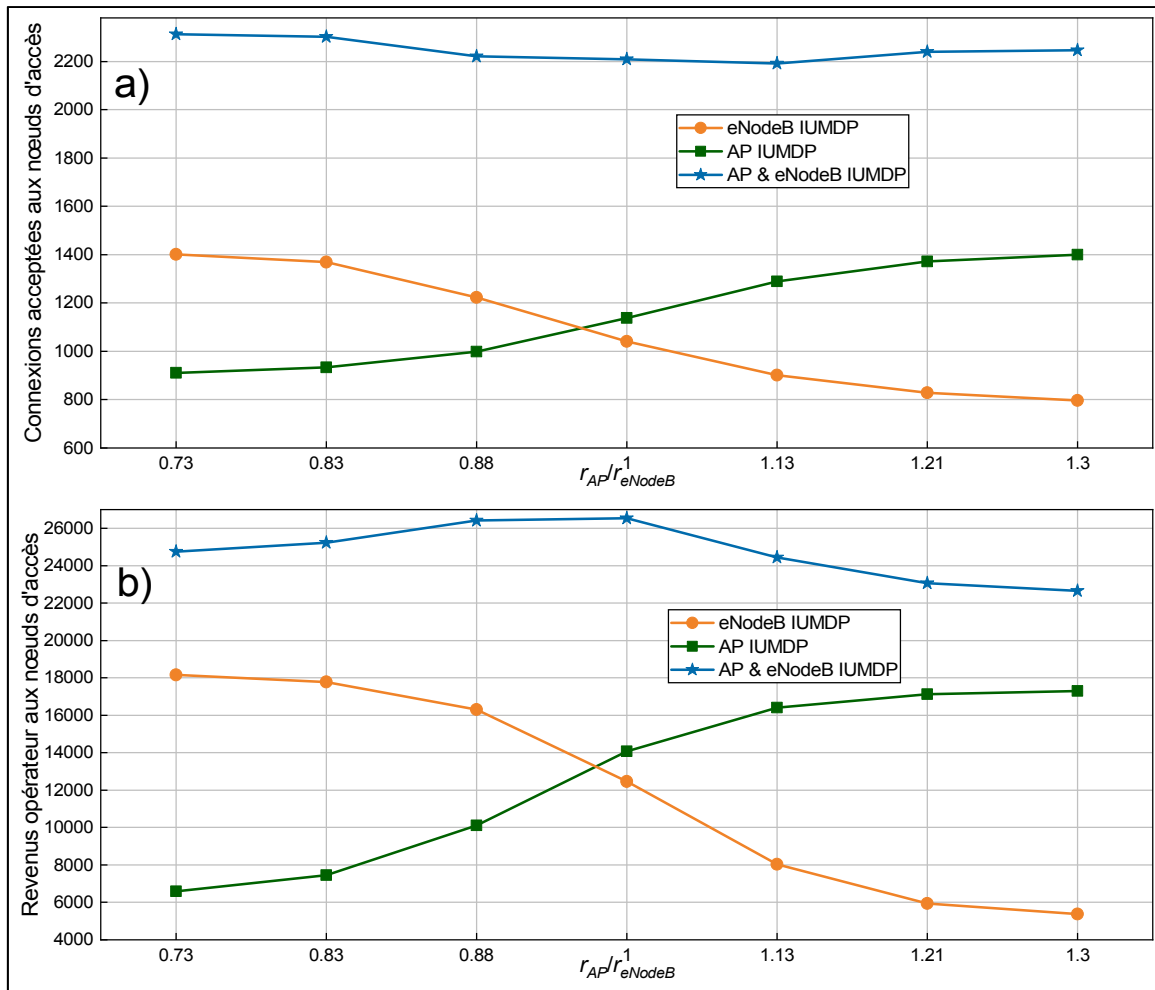


Figure 7.14 a) Connexions acceptées en fonction du rapport des paramètres de récompense avec IUMDP  
 b) Revenus provenant des nœuds en fonction du rapport des paramètres de récompense avec IUMDP

Ce qui suit résume l'analyse des variations des connexions acceptées aux nœuds d'accès et des variations des revenus de l'opérateur en fonction des rapports  $r_{AP}/r_{eNodeB}$ . La différenciation des paramètres de récompense au niveau des utilisateurs caractérise les classes d'utilisateurs. En variant le rapport entre les paramètres de récompense attribués aux classes d'utilisateurs, l'opérateur peut prioriser les utilisateurs d'une classe par rapport aux utilisateurs de l'autre classe. De plus, la différenciation des paramètres de récompense pour l'utilisation des différents nœuds d'accès permet de varier la distribution des connexions acceptées à ces nœuds ainsi que de varier la provenance des revenus de l'opérateur. Cette dernière différenciation peut

être motivée par diverses raisons. Par exemple, augmenter le nombre d'utilisateurs à certains nœuds dans le but de rentabiliser au maximum certaines technologies radio plus coûteuses (accélération de l'amortissement d'un bien en début de vie), ou bien rationaliser l'utilisation d'autres nœuds quand leurs coûts de maintenance deviennent élevés (amortissement d'un bien en fin de vie) ou encore équilibrer le nombre d'utilisateurs aux nœuds d'accès selon les zones et selon l'achalandage.

### 7.6.5 Répartiteur proposé : variation des débits utilisateurs

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à l'évolution des débits des utilisateurs obtenus avec le répartiteur proposé et ceux obtenus avec le répartiteur de base, le Lowest-RTT-First, pour les scénarios décrits à la section 7.5, c'est-à-dire quand certains utilisateurs utilisent le multichemin et d'autres restent en chemin unique. La figure 7.15 a) montre les débits avec le répartiteur Lowest-RTT-First. La figure 7.15 b) présente les débits avec le répartiteur proposé pour les poids des utilités de « améliorer le débit » et de « ne pas nuire » égaux à 0.5. La figure 7.15 c) présente les débits avec le répartiteur proposé pour le poids de l'utilité de « améliorer le débit » égal à 0.4 et le poids de l'utilité de « ne pas nuire » égal à 0.6.

Sur cette Figure 7.15, nous constatons que pour les deux types de répartiteurs de flux aux sous-sessions, les débits des utilisateurs multichemin (utilisateurs 1 et 2) connaissent une augmentation dès lors qu'ils enclenchent le multichemin (à  $t = 300$  s pour l'utilisateur 1 et à  $t = 800$  s pour l'utilisateur 2). Ceci est en accord avec l'objectif d'amélioration du débit. En revanche, les utilisateurs de chemin unique (utilisateurs 3 et 5) subissent une dégradation de leur débit respectif dès que les utilisateurs multichemin déclenchent le MPTCP. Avec le répartiteur proposé, la dégradation des débits des utilisateurs de chemin unique est moins prononcée (une baisse de 3.5 kbps avec le répartiteur proposé, contre une baisse de 5.6 kbps avec le répartiteur Lowest-RTT-First). En contrepartie, il y a une augmentation légèrement plus faible des débits des utilisateurs multichemin. En comparant la figure 7.15 b) et la figure 7.15 c) il apparaît que la dégradation des débits des utilisateurs de chemin unique peut être contrôlée avec le système de poids des utilités des objectifs « améliorer le débit » et du « ne pas nuire ».

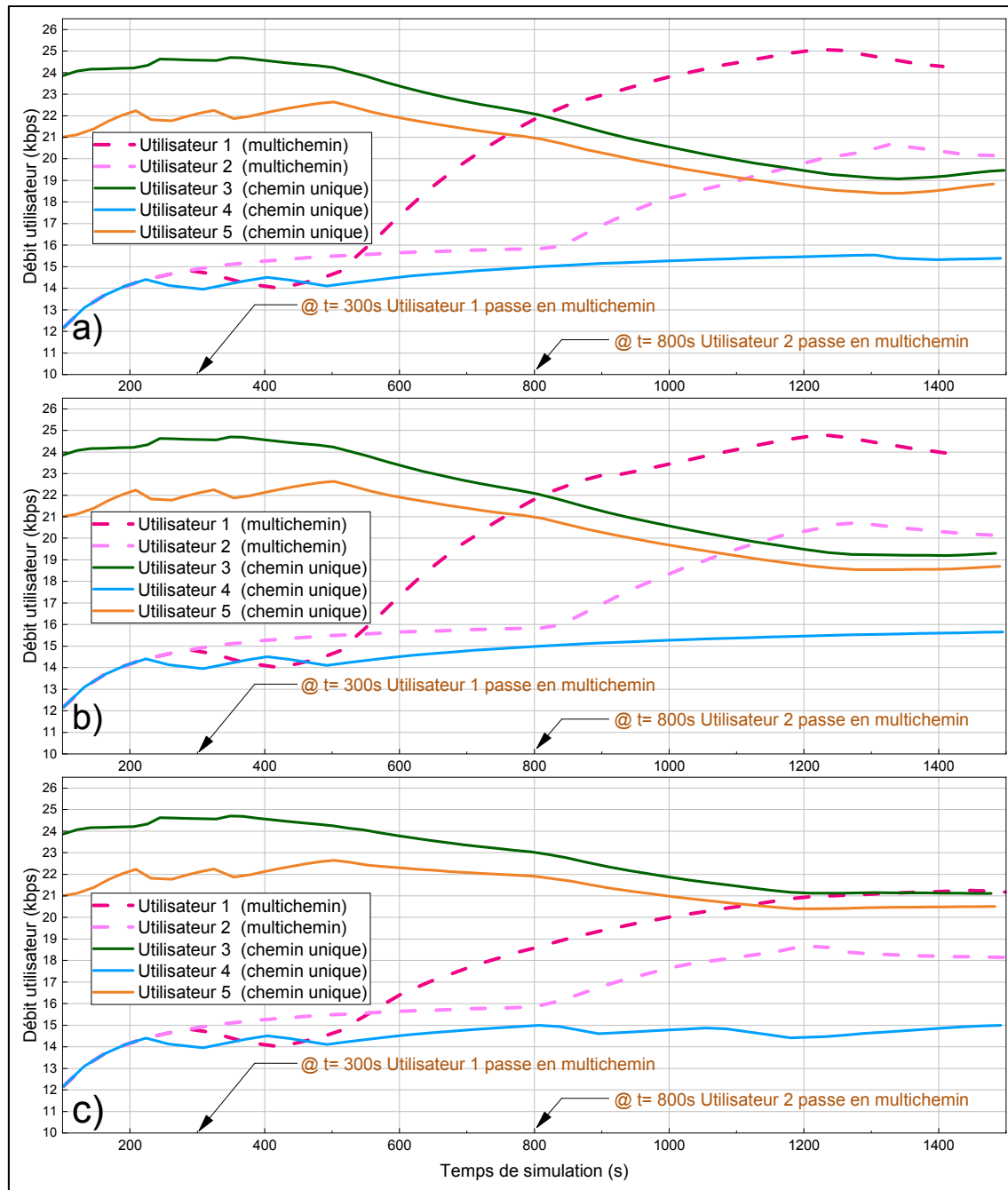


Figure 7.15 Variation des débits utilisateurs pour différents répartiteurs:  
 a) Lowest-RTT-First  
 b) répartiteur proposé, poids utilité « améliorer débit » et « ne pas nuire »  
     = 0.5 chacun  
 c) répartiteur proposé, poids utilité « améliorer débit » = 0.4, poids utilité  
     « ne pas nuire » = 0.6

## 7.7 Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté et analysé les résultats numériques des simulations. Après avoir présenté la méthode de sélection des nœuds d'accès basée sur RSS, nous avons fourni les résultats des trois méthodes de sélection des nœuds d'accès pour le revenu de l'opérateur de réseau, les débits reçus par les applications des utilisateurs, les délais de bout en bout sur les données des utilisateurs et les probabilités de blocage des utilisateurs. Les analyses ont porté sur les variations des valeurs des grandeurs susmentionnées en fonction de la charge du réseau et des valeurs des paramètres de récompense. Les résultats indiquent que l'opérateur de réseau obtient de meilleurs revenus avec les méthodes IUMDP et UFMDP au fur et à mesure qu'il y a plus d'utilisateurs dans le réseau, mais que ces revenus stagnent quand le réseau devient surchargé. Les délais de bout en bout sur les données des utilisateurs sont plus bas pour les méthodes IUMDP et UFMDP comparativement à ceux obtenus avec la méthode RSS. Pour les débits reçus par les applications des utilisateurs, RSS semble donner de bonnes valeurs par rapport à IUMDP et UFMDP pour les faibles charges, mais en analysant les distributions de ces débits aux utilisateurs pour les différentes charges du réseau, nous constatons que IUMDP et UFMDP se comportent mieux, car ils fournissent une faible dispersion des débits entre les utilisateurs et ont des moyennes géométriques plus élevées. Aussi, les probabilités de blocage sont plus basses pour IUMDP et UFMDP pour les réseaux non surchargés. Finalement, nous constatons que la variation des rapports entre les paramètres de récompense aussi bien au niveau des classes d'utilisateurs qu'au niveau des paramètres de récompense pour l'utilisation des nœuds d'accès permet d'une part de contrôler la priorité donnée à une classe d'utilisateurs et d'autre part de gérer la répartition des utilisateurs aux différents nœuds d'accès.



## CONCLUSION

Dans un contexte de réseaux sans fil hétérogènes composés de plusieurs technologies radio, il est primordial pour le terminal de choisir les réseaux d'accès adéquats, car la QoS sur les transferts de données dépend de plusieurs métriques qu'un seul nœud d'accès (basé sur une technologie radio donnée) ne peut fournir en valeurs suffisantes. De plus, dans les réseaux il y a deux partis dont il faut tenir compte des objectifs ; l'opérateur de réseau qui cherche à maximiser ses revenus et les utilisateurs qui veulent avoir une plus grande QoS. En outre, la sélection des nœuds d'accès doit être adaptée aux environnements dynamiques dont les états changent en fonction des comportements des utilisateurs et des conditions de transmission (propagation radio). La nécessité d'une bonne sélection de nœuds d'accès est plus accrue avec l'utilisation du protocole multichemin, le Multipath TCP dont les améliorations des métriques de QoS annoncées dépendent des performances des réseaux d'accès.

Nous avons abordé cette problématique en proposant dans cette thèse deux nouveaux modèles de sélection de nœuds d'accès basés sur les fonctions utilité et le processus de décision de Markov. Les modèles intègrent les objectifs des utilisateurs et de l'opérateur de réseaux en combinant leurs utilités. Pour les utilisateurs, nous avons utilisé une fonction utilité avec des métriques de qualité de service pertinentes tels que le débit et le délai de bout en bout. Pour l'opérateur de réseaux, l'utilité a été définie comme le revenu que celui-ci tire de ses infrastructures et la maximisation de ce revenu est obtenue en utilisant les concepts de prix caché et de gain net des nœuds dérivés de la théorie MDP.

Nous avons implémenté le protocole MPTCP dans le simulateur OMNET ++ en nous référant à la RFC 6824, puis nous avons testé les modèles de sélection de nœuds d'accès proposés pour les transferts de données avec trajet unique et avec trajets multiples dans des scénarios de réseau sans fil hétérogène WiFi-LTE. Les résultats de la simulation montrent que les modèles de sélection de nœuds d'accès proposés produisent des revenus pour l'opérateur de réseaux nettement plus grands que ceux offerts par la méthode de sélection de nœuds d'accès couramment utilisée qui est basée sur l'intensité du signal reçu (RSS). En même temps, les

probabilités de blocage des utilisateurs aux nœuds d'accès et les délais de bout en bout sur les données des utilisateurs sont également considérablement améliorés avec les modèles de sélection de nœuds d'accès proposés. Les scénarios testés montrent également des gains significatifs sur les revenus de l'opérateur et sur les débits des utilisateurs avec l'utilisation de l'option multichemin du protocole MPTCP.

La plupart des équipements utilisateurs dont il est question dans les réseaux sans fil sont mobiles. C'est pourquoi l'addition de la mobilité et la gestion des transferts intercellulaires sont des aspects à intégrer au cadre de la sélection des réseaux d'accès. Concernant le MPTCP, d'autres répartiteurs de flux aux sous-sessions conçus selon différents objectifs (exemple diminution de perte de paquets, diminution de gigue...) ou leurs combinaisons sont à étudier afin de pouvoir adapter des variantes de répartiteurs aux types d'applications en usage dans l'équipement utilisateur. Ceci sera réalisé dans le cadre de travaux futurs.

## **RECOMMANDATIONS**

Dans le but de rendre pragmatique le cadre de sélection de réseaux d'accès, nous recommandons les points suivants :

- Intégration de l'apprentissage par renforcement. Ce modèle de décision basé aussi sur MDP permettra d'automatiser les choix des valeurs des paramètres (exemple paramètres de récompense, poids des utilités de l'opérateur et de l'utilisateur) qui modifient le revenu de l'opérateur et la QoS des utilisateurs;
- Utilisation d'un cadre matériel pour une implémentation réelle des propositions d'amélioration du MPTCP dans les versions expérimentales existantes telles que celles disponibles pour les systèmes d'exploitation Linux et FreeBSD.



## ANNEXE I

### PRINCIPES ET FONCTIONNEMENTS DE MPTCP

#### Introduction

Le MPTCP est une extension de TCP qui est l'un des protocoles les plus utilisés pour le transfert des données dans les réseaux informatiques. C'est pourquoi le TCP apparaît comme l'élément principal de base pour exploiter l'usage des terminaux multihôtes avec l'utilisation de plusieurs chemins. D'autres protocoles de transport ont été proposés pour exploiter l'usage des équipements multihôtes tel que le CMT-SCTP (Concurrent Multichemin Transfer Using SCTP issue du protocole SCTP (Stewart, Xie, & Morneault, 2007) ou le MPRTTP (Multipath Real-time Transport Protocol). Cependant, ni le CM-SCTP ni le MPRTTP n'ont été adoptés à grande échelle en raison de leurs structures qui les rendent très vulnérables aux changements opérés dans les équipements intermédiaires (middleboxes = boîtiers intermédiaires dans une chaîne de communication) tels que les NAT (Network Address Translator) et pare-feu.

#### Architecture

Le MPTCP est basé sur le fonctionnement de TCP vis-à-vis de la couche application et de la couche réseau. De ce fait, la couche application voit une connexion MPTCP comme une connexion TCP standard. Pour la couche réseau, chacune des sous-sessions MPTCP apparaît comme une session TCP standard dont les segments présentent des nouveaux types d'options TCP. Le MPTCP gère la création, la suppression ainsi que l'utilisation de ces sous-sessions pour le transfert des données (C. R. A. Ford, M. Handley, O. Bonaventure, 2013). La figure A I-1 donne une vue schématique des relations entre TCP, MPTCP et les autres couches du modèle TCP/IP.

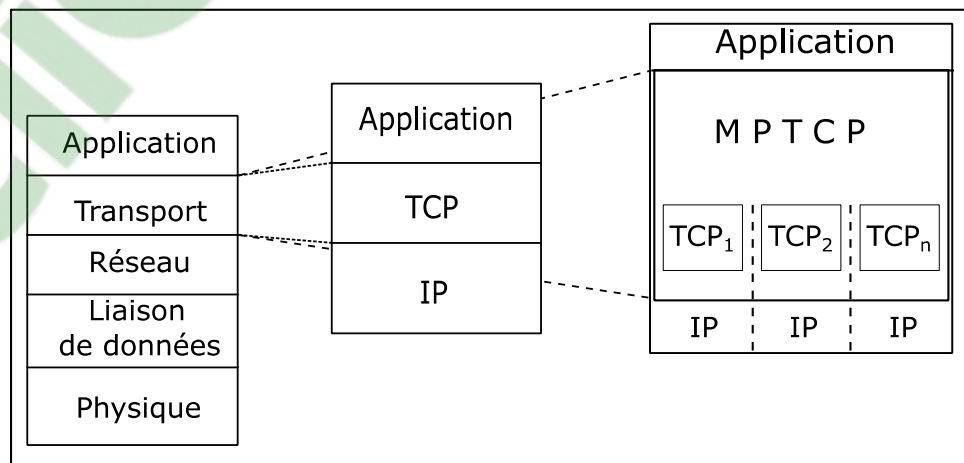


Figure-A I- 1 Correspondance entre TCP, MPTCP et la couche transport

Le module MPTCP assure les rôles suivants :

- Gestion des chemins, à travers lequel le MPTCP détecte et utilise les multiples chemins disponibles entre deux équipements terminaux ;
- Coordination des paquets, qui consiste en la subdivision en segments les flux d'octets venant de l'application. Au niveau de l'émetteur, MPTCP assigne ces segments aux différentes sous-sessions disponibles après avoir étiqueté chaque segment par son numéro de séquence correspondant à sa position dans le flux des données venant de l'application. C'est grâce à ce numéro que l'opération de réordonnancement est possible à la réception. Au niveau du récepteur, le MPTCP réassemble et réordonne si nécessaire les paquets venant des différentes sous-sessions TCP pour former le flux des données qu'il délivre à la couche application ;
- Interfaçage des sous-sessions TCP au module IP. Puisque chaque sous-session TCP ajoute son propre numéro de séquence aux segments et qu'il a sa propre série de valeurs d'acquittements, MPTCP garde trace de ces valeurs, ce qui lui permet d'acheminer les paquets reçus du module IP à la bonne sous-session TCP ;
- Contrôle de congestion à travers lequel le MPTCP coordonne le contrôle de congestion à travers chacune des sous-sessions.

### Initialisation de la connexion

L'ouverture d'une session en MPTCP se fait sur un seul chemin. Comme pour une connexion TCP ordinaire, il y a l'initialisation avec la poignée de main en trois étapes avec échange des segments SYN, SYN/ACK et ACK. Le sous-type Multipath Capable (MP\_CAPABLE) est inclus dans les trois segments TCP ci-dessus (dans l'option MPTCP) et sert à indiquer explicitement au terminal distant que son correspondant supporte le protocole MPTCP et qu'il souhaite l'utiliser pour établir cette connexion. Voir la figure A I-2 ci-dessous. Le sous-type Multipath Capable transporte aussi les informations de clés codées sur 64 bits générées par les hôtes et est nécessaire pour l'authentification des sous-sessions additionnelles.

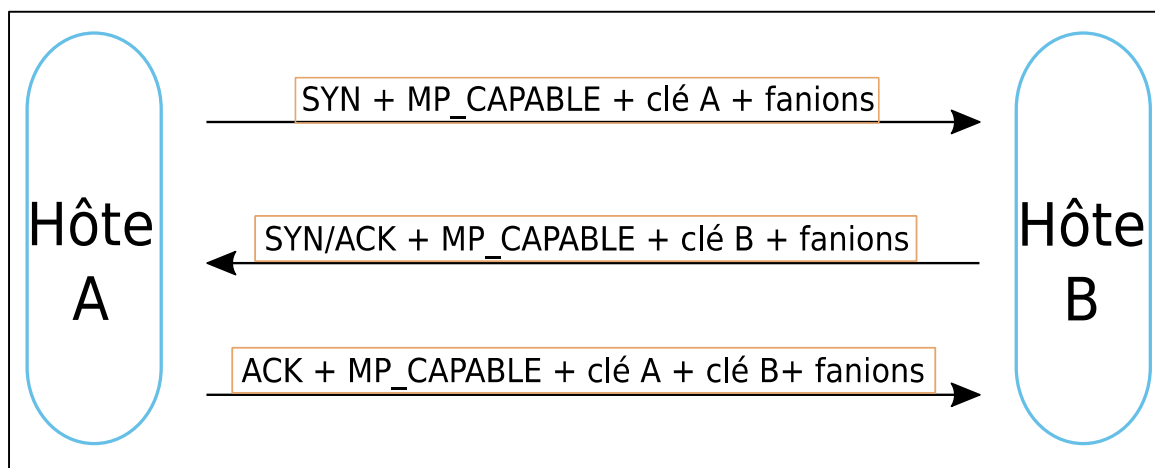


Figure-A I- 2 Étapes d'initialisation d'une connexion MPTCP

### Ajout d'une nouvelle sous-session

Une fois la connexion MPTCP établie avec l'échange MP\_CAPABLE, d'autres sous-sessions peuvent être ajoutées à la connexion. Les hôtes ont connaissance de leurs propres adresses et peuvent prendre connaissance des adresses des autres hôtes par le biais des échanges de signalisation avec le sous-type Add Address (ADD\_ADDR) qui est décrit dans la section suivante. En utilisant cette connaissance des adresses, un hôte peut initier une nouvelle sous-session sur une paire d'adresses inutilisées. N'importe quel hôte peut initier l'ajout de sous-session, mais en général, c'est l'initiateur de la connexion d'origine qui initie l'ajout de sous-session. La nouvelle sous-session, comme la session TCP standard commence avec l'échange des segments SYN, SYN/ACK et ACK. Cependant ici, le sous-type Join Connection (MP\_JOIN) est utilisé et contient les éléments d'authentification et de vérification comme montré sur la figure A I-3.

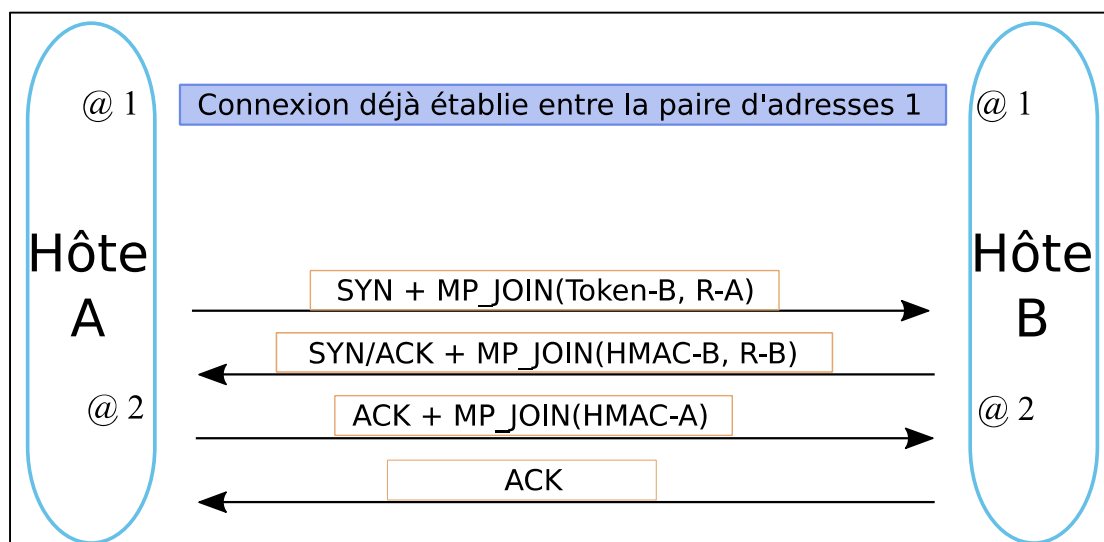


Figure-A I-3 Étapes pour l'ajout de sous-session avec le sous-type MP\_JOIN

Les contenus des échanges à travers le sous-type MP\_JOIN sont les suivants (C. R. A. Ford, M. Handley, O. Bonaventure, 2013) :

- Token (jeton) : hachage cryptographique des clés échangées pendant l'établissement de la connexion initiale. Il permet l'identification de la connexion MPTCP ;
- R-A et R-B : deux nombres aléatoires générés respectivement par l'hôte A et l'hôte B ;
- HMAC (Hash-based Message Authentication Code) : hachage généré avec l'algorithme SHA-1 et qui permet l'authentification sécurisée entre les équipements participant à la même connexion MPTCP. Le HMAC-A est généré par l'hôte A et le HMAC-B est généré par l'hôte B ( $\text{HMAC-A} = \text{HMAC}(\text{Clé} = (\text{Clé-A} + \text{Clé-B}), \text{Msg} = (\text{R-A} + \text{R-B}))$  et  $\text{HMAC-B} = \text{HMAC}(\text{Clé} = (\text{Clé-B} + \text{Clé-A}), \text{Msg} = (\text{R-B} + \text{R-A}))$ );
- adresse ID : identifiant de l'adresse source du paquet qui permet de retracer l'adresse au cas où cette dernière aurait été modifiée par un équipement intermédiaire.

Séquencement des données (data sequence mapping)

Pour assurer une livraison en ordre du flux de données transmis sur une ou plusieurs sous-sessions et de façon fiable, la destination doit pouvoir placer les informations reçues d'une sous-session à sa place correcte dans l'espace de séquence de données et puis accuser réception du transfert. Pour le séquencement des données et l'acquittement des réceptions, le MPTCP utilise le sous-type DSS (Data Sequence Signal). Le DSS achemine les informations de mappage qui spécifient la manière dont l'espace des séquences des sous-sessions est lié à l'espace des séquences des données en ce qui concerne les numéros des séquences de départ pour les sous-sessions et le niveau données ainsi que la taille des données qui leur est associée. Le DSS achemine aussi les accusés de réception au niveau des données de la connexion globale. Les figures A I-4 et A I-5 montrent respectivement les champs pour le sous-type DSS et un exemple de mappage et acheminement des données sur deux sous-sessions.

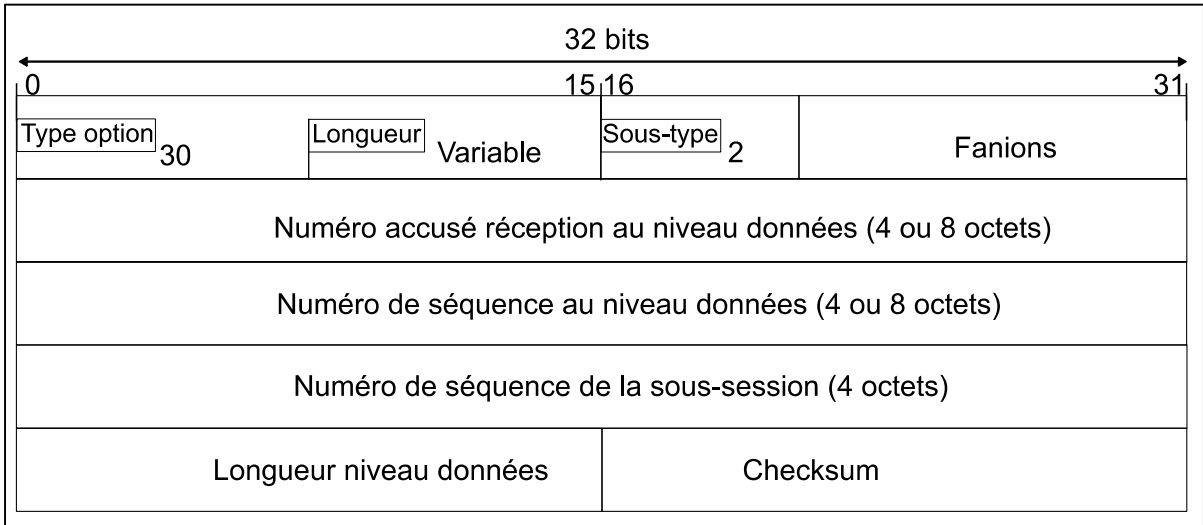


Figure-A I-4 Différents champs du sous-type Data Sequence Signal

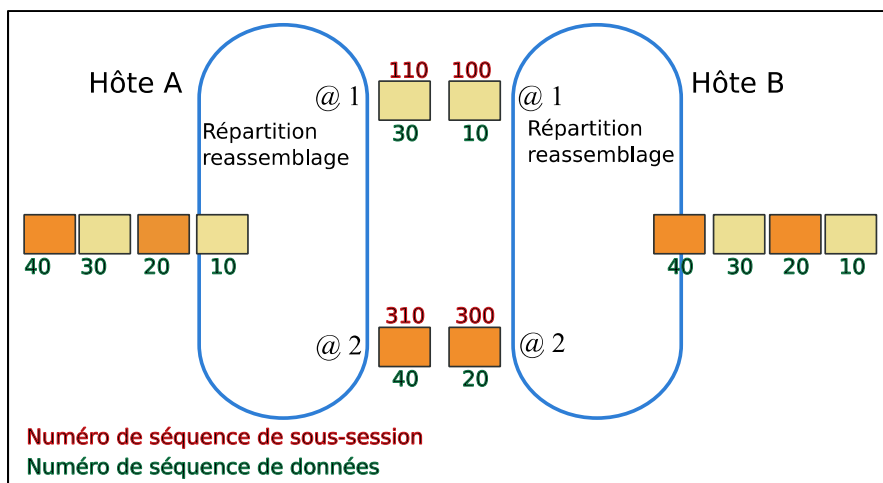


Figure-A I-5 Exemple de mappage des données et distribution aux sous-sessions

### Acquittement des données

Pour fournir une résilience complète de bout en bout, MPTCP fournit un accusé de réception au niveau de la connexion, qui agit comme un ACK cumulatif pour la connexion dans son ensemble. C'est le champ « Numéro accusé de réception au niveau données » du sous-type DSS (voir figure A I-4). L'acquittement de données est analogue au comportement de l'acquittement cumulatif du TCP standard - indiquant combien de données ont été reçues avec succès (C. R. A. Ford, M. Handley, O. Bonaventure, 2013). C'est une comparaison avec l'ACK au niveau du sous-flux, qui agit de manière analogue à TCP SACK, étant donné qu'il peut rester des trous dans le flux de données au niveau de la connexion. L'ACK de données spécifie le prochain numéro de séquence de données qu'il s'attend à recevoir.

La séparation des acquittements au niveau connexion et au niveau des sous-sessions est un atout qui permet de libérer l'espace mémoire de son buffer occupé par le segment acquitté avant l'acquittement au niveau connexion en autant que les buffers des sous-sessions soient dissociés, sinon toutes les données doivent être conservées jusqu'à l'acquittement au niveau connexion.

### Fermeture de la connexion

Pour le TCP standard, le fanion « FIN » dans l'entête du segment signale au récepteur que l'émetteur n'a plus de données à envoyer. Pour permettre un fonctionnement indépendant de chacune des sous-sessions et garder l'apparence au TCP, le fanion « FIN » en MPTCP n'affecte que la sous-session sur laquelle il est envoyé. La fermeture d'une application dans un échange avec le MPTCP se fait donc avec le fanion « DATA\_FIN » qui indique que l'émetteur n'a plus de données à envoyer. DATA\_FIN a la même signification que FIN pour le TCP standard et est signalé dans la zone des fanions du sous-type DSS en réglant le fanion « F ». DATA\_FIN peut être aussi utilisée pour vérifier que toutes les données ont été reçues avec succès (C. R. A. Ford, M. Handley, O. Bonaventure, 2013).



## ANNEXE II

### OPTIMISATION PAR ESSAIM DE PARTICULES (PSO)

La PSO est une technique algorithmique permettant de trouver une solution aux problèmes d'optimisation en déplaçant une population de solutions potentielles appelées particules dans l'espace de recherche d'une fonction objectif. Développée à l'origine par J. Kennedy et R. Eberhart en 1995 et présenté dans (Kennedy & Eberhart, 1995), la PSO est très populaire. Elle a été utilisée pour résoudre des problèmes dans divers domaines et a démontré son efficacité pour trouver rapidement des solutions et sa facilité de mise en œuvre.

Les formules mathématiques des vitesses et de la mise à jour des positions issues de la version standard de la PSO (version de la PSO proche de celles données par les fondateurs) sont respectivement listées ci-dessous. Étant donné une fonction  $F: S \rightarrow \mathbb{R}$  de dimension  $D \in \mathbb{N}$  à optimiser, la solution est trouvée en déplaçant  $N$  particules ( $N \in \mathbb{N}$ ) dans la zone de recherche  $S$ . Pour la  $i^{ième}$  particule  $i = 1, 2, \dots, N$ , la vitesse est mise à jour à chaque itération et pour chaque dimension par la formule:

$$v_{i,d}(t+1) = v_{i,d}(t) + \alpha \varphi_{1,d} [pb_{i,d}(t) - x_{i,d}(t)] + \beta \varphi_{2,d} [gb_d(t) - x_{i,d}(t)] \quad (\text{A-II.1})$$

où  $v_{i,d}(t+1)$  est la vitesse à l'itération  $t+1$ ,  $v_{i,d}(t)$  la vitesse à l'itération  $t$  et  $d=1,2,\dots, D$  la dimension.  $pb_{i,d}(t)$  est la meilleure position de la particule connue à l'itération  $t$  et  $gb_d(t)$  est la meilleure position globale parmi toutes les positions des particules à l'itération  $t$ . Les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  sont les constantes d'accélération avec les valeurs typiques de  $\alpha \cong \beta \cong 2$ .  $\varphi_{1,d}$  et  $\varphi_{2,d}$  sont des valeurs aléatoires générées à chaque itération. Pour la  $i^{ième}$  particule, la formule de la mise à jour de la position de la particule à chaque itération et pour chaque dimension est :

$$x_{i,d}(t+1) = x_{i,d}(t) + v_{i,d}(t+1) \quad (\text{A-II.2})$$

où  $x_{i,d}(t+1)$  est la position à l'itération  $t+1$ ,  $x_{i,d}(t)$  la position à l'itération  $t$ . En 2008, Xin-She Yang a développé une version de PSO, APSO (Accelerated Particle Swarm Optimization (optimisation par essaim de particules accélérée)) présentée dans (Yang, 2010), qui accélère la convergence du PSO standard. Dans APSO, l'expression du vecteur vitesse utilise uniquement la meilleure position globale, comme indiqué ci-dessous :

$$v_{i,d}(t+1) = v_{i,d}(t) + \beta [gb_d(t) - x_{i,d}(t)] + \alpha \varphi_d \quad (\text{A-II.3})$$

La mise à jour de la position reste identique à ce qui est exprimé dans l'équation A-II.2. Après quelques simplifications, l'auteur a donné une formule de mise à jour de position plus simple :

$$x_{i,d}(t+1) = [1 - \beta]x_{i,d}(t) + \beta g b_d(t) + \alpha \varphi_d \quad (\text{A-II.4})$$

D'autres améliorations ont été ajoutées à APSO; le coefficient  $\alpha$  utilise une fonction monotone décroissante pour devenir :

$$\alpha = \alpha_0 \gamma^t, 0.5 < \alpha_0 < 1, 0 < \gamma < 1 \quad (\text{A-II.5})$$

où  $\alpha_0$  est la valeur initiale du paramètre d'entropie et  $\gamma$  le paramètre de contrôle de la fonction monotone.

Le coefficient  $\beta$  varie pendant les itérations et peut prendre les valeurs dans une table de chaos. Dans notre cas, nous avons adopté la table de chaos sinusoïdale. Par conséquent,  $\beta$  est maintenant exprimé par :

$$\beta(t+1) = \sin(\pi\beta(t)), 0 < \beta(t=0) < 1 \quad (\text{A-II.6})$$

APSO avec les deux améliorations ci-dessus est appelé PSO accéléré par chaos et pour la  $i^{\text{ème}}$  particule, la mise à jour de la position est exprimée comme suit:

$$x_{i,d}(t+1) = x_{i,d}(t) + \sin(\pi\beta(t)) [g b_d(t) - x_{i,d}(t)] + \alpha_0 \gamma^t \varphi_d \quad (\text{A-II.7})$$

avec  $\alpha_0 \in [0.5, 1]$ ,  $\beta(t=0) \in [0.1, 0.7]$ ,  $\gamma \in [0, 1]$  et  $\varphi_d \in N(0,1)$ .

Pour relier l'utilisation de PSO à notre thèse nous rappelons que l'objectif d'optimisation est de maximiser les débits utilisateurs donnés par les différents chemins, ceci est exprimé par la fonction objective

*Maximiser  $R_n(T_n, l_n)$*

où les débits sont calculés avec l'équation

$$R_n = \min \left\{ \frac{W_n}{T_n}, \frac{1}{T_n \sqrt{\frac{2}{3}} b_n l_n + T_{o_n} \min \left( 1, \sqrt{\frac{3}{8}} b_n l_n \right) l_n (1 + 32 l_n^2)} \right\} \quad (\text{A-II.8})$$

où  $W_n$ ,  $T_n$ ,  $b_n$ ,  $l_n$ ,  $To_n$  sont, respectivement, la taille maximale de la fenêtre, le RTT, le nombre de paquets par nouvel acquittement, le taux de perte de paquets et le délai d'inactivité initial pour la retransmission. Dans les particules représentent les solutions potentielles aux couples  $(T_n, l_n)$  qui maximisent le débit.

Le pseudo-code de l'algorithme d'optimisation avec le PSO accéléré par chaos est listé ci-dessous :

Algorithme-A I-1 Recherche de valeurs optimales d'une fonction par APSO

|     |                                                                                                          |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | Set algorithm parameters: number of particles, $\alpha_0$ , $\beta_0$ , $\gamma$ , precision, difference |
| 2.  | Set objective function                                                                                   |
| 3.  | <b>for each</b> particle                                                                                 |
| 4.  | initialize particle position                                                                             |
| 5.  | evaluate current particle position                                                                       |
| 6.  | evaluate particle global best $g^*$                                                                      |
| 7.  | <b>end for</b>                                                                                           |
| 8.  | <b>while</b> (difference > precision)                                                                    |
| 9.  | evaluate current function value                                                                          |
| 10. | <b>for each</b> particle                                                                                 |
| 11. | update particle positions: particle best $x^*$ , global best $g^*$                                       |
| 12. | <b>end for</b>                                                                                           |
| 13. | evaluate new function value (with new particle positions)                                                |
| 14. | evaluate difference = new function value – current function value                                        |
| 15. | advance iteration                                                                                        |
| 16. | <b>end while</b>                                                                                         |
| 17. | output results: global best $g^*$ , new function value                                                   |



## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A. Ford, C. R., M. Handley, O. Bonaventure. (2013). TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses. *RFC 6824, IETF*.
- A. Ford, C. R., M. Handley, S. Barre. (2011). Architectural Guidelines for Multipath TCP Development. *RFC 6182, IETF*.
- Andrysiak, T., Saganowski, Ł., & Maszewski, M. (2018). Time Series Forecasting Using Holt-Winters Model Applied to Anomaly Detection in Network Traffic. Dans H. Pérez García, J. Alfonso-Cendón, L. Sánchez González, H. Quintián & E. Corchado (Éds.), *International Joint Conference SOCO'17-CISIS'17-ICEUTE'17 León, Spain, September 6–8, 2017, Proceeding* (pp. 567-576). Springer International Publishing.
- Bari, F., & Leung, V. C. m. (2007). Automated network selection in a heterogeneous wireless network environment. *IEEE Network*, 21(1), 34-40. doi: 10.1109/MNET.2007.314536
- Bellman, R. (1966). Dynamic Programming. *Science*, 153(3731), 34. Repéré à <http://science.sciencemag.org/content/153/3731/34.abstract>
- Bertsekas, D. P. (1987). *Dynamic programming: deterministic and stochastic models*. Prentice-Hall, Inc.
- C. Raiciu, M. H., D. Wischik. (2011). Coupled Congestion Control for Multipath Transport Protocols, draft-ietf-mptcp-congestion-01. *RFC 6356, IETF*.
- Cavazos-Cadena, R. (2002). Value iteration and approximately optimal stationary policies in finite-state average Markov decision chains. *Mathematical Methods of Operations Research*, 56(2), 181-196. doi: 10.1007/s001860200205. Repéré à <https://doi.org/10.1007/s001860200205>
- Charilas, D. E., Markaki, O. I., Psarras, J., & Constantinou, P. (2009). Application of Fuzzy AHP and ELECTRE to Network Selection. *Mobile Lightweight Wireless Systems*, 13, 63-73. Repéré à <Go to ISI>://WOS:000302328500007
- Chen, L., Shu, H., & Wang, N. (2010). An utility-based network selection scheme for future urban road wireless networks. Dans *5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2010, June 15, 2010 - June 17, 2010* (pp. 181-185). IEEE Computer Society. doi: 10.1109/ICIEA.2010.5516760
- Chen, Y.-H., Yang, N.-Y., Chang, C.-J., & Ren, F.-C. (2007). A utility function-based access selection method for heterogeneous WCDMA and WLAN networks. Dans *18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC'07, September 3, 2007 - September 7, 2007*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/PIMRC.2007.4394636

- Corberán-Vallet, A., Bermúdez, J. D., & Vercher, E. (2011). Forecasting correlated time series with exponential smoothing models. *International Journal of Forecasting*, 27(2), 252-265. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2010.06.003>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169207010001172>
- Dziong, Z. (1997). ATM Network Resource Management. *Mcgraw-Hill (Tx)*, 315.
- Falowo, O. E., & Chan, H. A. (2011). RAT selection for multiple calls in heterogeneous wireless networks using modified topsis group decision making technique. Dans *2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* (pp. 1371-1375). doi: 10.1109/PIMRC.2011.6139726
- Friis, H. T. (1946). A Note on a Simple Transmission Formula. *Proceedings of the IRE*, 34(5), 254-256. doi: 10.1109/JRPROC.1946.234568
- Gardner, E. S. (2006). Exponential smoothing: The state of the art—Part II. *International Journal of Forecasting*, 22(4), 637-666. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.005>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169207006000392>
- Gita, M., Mahamod, I., & Rosdiadee, N. (2015). Vertical Handover Decision Algorithm Using Multicriteria Metrics in Heterogeneous Wireless Network. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2015. doi: 10.1155/2015/539750
- Grassmann, W. K. (1977). Transient solutions in Markovian queueing systems. *Computers & Operations Research*, 4(1), 47-53. doi: 10.1016/0305-0548(77)90007-7. Repéré à [http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548\(77\)90007-7](http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548(77)90007-7)
- Holt, C. C. (2004). Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. *International Journal of Forecasting*, 20(1), 5-10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2003.09.015>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169207003001134>
- Hwang, C. L., Lai, Y. J., & Liu, T. Y. (1993). A new approach for multiple objective decision making. *Computers & Operations Research*, 20(8), 889-899. doi: 10.1016/0305-0548(93)90109-V
- J.D. Bentkover, V. T. C., J.L. Mumpower. (1986). *Benefits Assessment - The State of the Art*.
- Jiandong, X., Ying-Chang, L., Yiyang, P., Jun, F., & Li, W. (2017). Intelligent multi-radio access based on markov decision process. Dans *2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2017)*, 4-8 Dec. 2017 (pp. 6 pp.). IEEE. doi: 10.1109/GLOCOM.2017.8254596. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254596>

- Kassar, M., Kervella, B., & Pujolle, G. (2008). An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks. *Computer Communications*, 31(10), 2607-2620.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. Dans *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 27 Nov.-1 Dec. 1995 (Vol. vol.4, pp. 1942-1948). IEEE. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Khloussy, E., Gelabert, X., & Jiang, Y. (2015). Investigation on MDP-based radio access technology selection in heterogeneous wireless networks. *Computer Networks*, 91, 57-67. doi: 10.1016/j.comnet.2015.08.005
- Liang, G., Yu, H., Guo, X., & Qin, Y. (2019). Joint Access Selection and Bandwidth Allocation Algorithm Supporting User Requirements and Preferences in Heterogeneous Wireless Networks. *IEEE Access*, 7, 23914-23929. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2899405
- Miyim, A. M., Ismail, M., Nordin, R., & Mahardhika, G. (2013). Generic vertical handover prediction algorithm for 4G wireless networks. Dans *2013 IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)* (pp. 307-312). doi: 10.1109/IconSpace.2013.6599486
- Paasch, C., Ferlin, S., Alay, O., & Bonaventure, O. (2014). Experimental evaluation of multipath TCP schedulers. Dans *ACM SIGCOMM 2014 Capacity Sharing Workshop, CSWS 2014, August 18, 2014 - August 18, 2014* (pp. 27-32). Association for Computing Machinery. doi: 10.1145/2630088.2631977. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1145/2630088.2631977>
- Padhye, J., Firoiu, V., Towsley, D. F., & Kurose, J. F. (2000). Modeling TCP Reno performance: a simple model and its empirical validation. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 8(2), 133-145. doi: 10.1109/90.842137
- Partov, B., & Leith, D. J. (2015). Utility fair RAT selection in multi-homed LTE/802.11 networks. Dans *2015 53rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)* (pp. 582-589). doi: 10.1109/ALLERTON.2015.7447057
- Proakis, J. G., & Salehi, M. (2008). *Digital communications* (5th ed. éd.). Boston: McGraw-Hill.
- Quoc-Thanh, N.-V., Ghamri-Doudane, Y., & Agoulmine, N. (2008). On utility models for access network selection in wireless heterogeneous networks. Dans *NOMS 2008 - 2008 IEEE Network Operations and Management Symposium - Pervasive Management for Ubiquitous Networks and Services, 7-11 April 2008* (pp. 144-151). IEEE. doi: 10.1109/NOMS.2008.4575128

- Ramaboli, A. L., Falowo, O. E., & Chan, A. H. (2013). Using Multiple Links Simultaneously to Increase Capacity for Multi-homed Terminals in Heterogeneous Wireless Networks. Dans *2013 IEEE 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)* (pp. 788-793). doi: 10.1109/AINA.2013.154
- Roy, B. (1978). ELECTRE III: An algorithm based on a fuzzy representation of preferences in the presence of multiple criteria. *Cahiers du Centre d'Etudes de Recherche Operationelle*, 20(1), 3-24.
- Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. *McGraw-Hill (Tx)*
- Scharf, M., & Kiesel, S. (2007). Head-of-line blocking in TCP and SCTP: Analysis and measurements. Dans *IEEE GLOBECOM 2006 - 2006 Global Telecommunications Conference, November 27, 2006 - December 1, 2006*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/GLOCOM.2006.333
- Schweitzer, P. J., & Federgruen, A. (1979). Geometric Convergence of Value-Iteration in Multichain Markov Decision Problems. *Advances in Applied Probability*, 11(1), 188-217. doi: 10.2307/1426774
- Sevcik, P. (2002). Understanding how users view application performance [web sites]. *Business Communications Review*, 32(7), 8-9.
- Sgora, A., Chatzimisios, P., & Vergados, D. D. (2010). Access network selection in a heterogeneous environment using the AHP and fuzzy TOPSIS methods. Dans *2nd International ICST Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems, MOBILIGHT 2010, May 10, 2010 - May 12, 2010* (Vol. 45 LNICST, pp. 88-98). Springer Verlag. doi: 10.1007/978-3-642-16644-0\_9
- Shaw, J. A. (2013). Radiometry and the Friis transmission equation. *American Journal of Physics*, 81(1), 33-37. doi: 10.1119/1.4755780. Repéré à <http://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.4755780>
- Shuo, Z., & Qi, Z. (2016). The birth and death process enhanced optimization algorithm for multi-access selection in heterogeneous wireless networks. *Journal of Information Science and Engineering*, 32(2), 455-475.
- Sigaud, O., & Buffet, O. (2008, p. 20). *Processus décisionnels de Markov en intelligence artificielle*.
- Singh, J. P., Alpcan, T., Agrawal, P., & Sharma, V. (2010). A Markov Decision Process based flow assignment framework for heterogeneous network access. *Wireless Networks*, 16(2), 481-495. doi: 10.1007/s11276-008-0148-8

- Stewart, R., Xie, Q., & Morneault, K. (2007). IETF RFC 4960 Stream Control Transmission Protocol: 2000.
- Varga, A. (2016). INET Framework for the OMNeT++ Discrete Event Simulator. URL:<https://github.com/inet-framework/inet>. Repéré à <https://github.com/inet-framework/inet>
- Verma, R., & Singh, N. P. (2013). GRA Based Network Selection in Heterogeneous Wireless Networks. *Wireless Personal Communications*, 72(2), 1437-1452. doi: 10.1007/s11277-013-1087-y
- Virdis, A., Stea, G., & Nardini, G. (2014). SimuLTE - A modular system-level simulator for LTE/LTE-A networks based on OMNeT++. Dans *2014 4th International Conference On Simulation And Modeling Methodologies, Technologies And Applications (SIMULTECH)* (pp. 59-70). doi: 10.5220/0005040000590070
- W. Hashim, A. F. I., N. A. Abd Ghafar, and S. Dzulkifly. (2013). Cognitive Selection Mechanism Performance in IEEE 802.11 WLAN. *International Journal of Computer and Communication Engineering* vol. 2, no. 4, pp. 477-481.
- Wang, X., Qu, D., Li, K., Cheng, H., Das, S. K., Huang, M., . . . Chen, S. (2017). A flexible and generalized framework for access network selection in heterogeneous wireless networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 40, 556-576. doi: 10.1016/j.pmcj.2017.01.001. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmcj.2017.01.001>
- Xiaoxin, Q., & Chawla, K. (1999). On the performance of adaptive modulation in cellular systems. *IEEE Transactions on Communications*, 47(6), 884-895. doi: 10.1109/26.771345. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/26.771345>
- Yan, X., Ahmet Şekercioğlu, Y., & Narayanan, S. (2010). A survey of vertical handover decision algorithms in Fourth Generation heterogeneous wireless networks. *Computer Networks*, 54(11), 1848-1863.
- Yang, X.-S. (2010). Engineering optimization: an introduction with metaheuristic applications. *John Wiley & Sons*.