

N° d'ordre : 229/2019



**UNIVERSITÉ SULTAN MOULAY
SLIMANE**
Faculté des Sciences et Techniques
Béni Mellal



Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques

Formation doctorale : Mathématiques et Physique Appliquées

Structure d'accueil : Traitement de l'Information et Aide à la Décision

THÈSE

Présentée par

Driss AIT OMAR

Pour l'obtention du grade de

Docteur

Spécialité : Informatique

Application de la Théorie des Jeux et l'Apprentissage Automatique au Marché Télécom

Soutenue le 30/11/2019 à 10h devant le jury composé de :

Pr Abdellatif HAIR,	Professeur à la FST, Béni Mellal, Maroc	Président.
Pr Essaid SABIR,	Professeur à l'ENSEM, Casablanca, Maroc	Rapporteur.
Pr Rachid EL AYACHI,	Professeur à la FST, Béni Mellal, Maroc	Rapporteur.
Pr Mohammed ERRITALI,	Professeur à la FST, Béni Mellal, Maroc	Rapporteur.
Pr Hicham MOUNCIF,	Professeur à la FP, Béni Mellal, Maroc	Examineur.
Pr Mohamed BASLAM,	Professeur à la FST, Béni Mellal, Maroc	Co-directeur de Thèse.
Pr Mohamed FAKIR,	Professeur à la FST, Béni Mellal, Maroc	Directeur de Thèse.

À ma grande mère
À ma mère
À mon père
À mon épouse
À mes enfants
À mes sœurs
À mes frères
À ma grande famille
À mes amis.

Remerciements

Je n'aurais jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien d'un grand nombre de personnes dont la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifestés à l'égard de ma recherche m'ont permis de progresser dans cette phase délicate.

En premier lieu, je remercie mes directeurs de thèse, les professeurs **Mohamed FAKIR** et **Mohamed BASLAM**, pour la confiance qu'ils m'ont accordé en acceptant d'encadrer ce travail doctoral, pour leurs multiples conseils et pour toutes les heures qu'ils ont consacré à diriger cette recherche. J'aimerais également leur dire à quel point j'ai apprécié leur grande disponibilité et respect sans faille des délais serrés de relecture des documents que je leur ai adressé. Enfin, j'ai été extrêmement sensible à leurs qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail doctoral.

Je tiens également à remercier Monsieur **Essaid SABIR**, Monsieur **Rachid EL AYACHI** et Monsieur **Mohammed ERRITALI** pour le temps et l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant d'en être rapporteurs. Un immense merci également à Monsieur **Abdellatif HAIR** pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de ma thèse. Je remercie également Monsieur **Hicham MOUNCIF** d'avoir accepté de participer au jury de ma thèse, c'est un honneur.

Je présente mes sincères remerciements à tous mes enseignants, durant toutes les années de mes études, qui ont participé à ma formation et pour leurs conseils et encouragements.

J'adresse mes remerciements à tous les membres du laboratoire TIAD et à mes collègues, en particulier **M'hamed OUTANOUE**, **Hamid GARMANI** et **Mohamed EL AMRANI** pour leurs contributions, discussions et les échanges fructueux que nous avons entretenus pendant ces années de recherche.

Enfin, pour leur soutien moral, je tiens à remercier ma grande mère, mes parents, mon épouse, mes enfants (**Mouâd** et **Achraf**), mes frères et mes sœurs pour leur soutien inconditionnel, sans qui ce travail n'aurait jamais pu voir le jour. Je leur dédie ce travail.

Que tous ceux qui m'ont apporté leurs aides, de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail, trouvent ici l'expression de mes sincères gratitude.

Liste des Publications

Publications dans des Revues Internationales

1. **Driss Ait Omar**, Hamid Garmani, Mohamed El Amrani , Mohamed Baslam & Mohamed FAKIR, *A Customer' Confusion Environment in Telecommunication Networks : Analysis and Policy Impact*, International Journal of Cooperative Information Systems, 28(02) :1930002, Avril (2019).
<https://doi.org/10.1142/S021884301930002X>.
2. **Driss Ait Omar**, M'hamed Outanoute, Mohamed Baslam, Mohamed Fakir & Belaid Bouikhalene, *On Understanding Price-QoS War for Competitive Market and Confused Consumers*, Computing, 101(9) :1327-1348, Septembre(2019).
<https://doi.org/10.1007/s00607-018-0642-5>.
3. **Driss Ait Omar**, Hamid Garmani, Mohamed El Amrani , Mohamed Baslam & Mohamed FAKIR, *Analyzing the Customers' Dynamic Confusion in Telecommunication Networks Share Game*, International Journal of Business Data Communications and Networking (IJBDCN), 15(02),(2019).
<https://doi.org/10.4018/IJBDCN.2019070102>.
4. **Driss Ait Omar**, Hamid Garmani, Mohamed EL AMRANI , Mohamed Baslam & Mohamed FAKIR, *Analysis of Bargaining Game Policy in the Internet Content Distribution Chain*, International Journal of Mobile Computing and Multimedia Communications (IJMCMC), Volume 10, Issue 3, 2019.
<https://doi.org/10.4018/IJMCMC..2019070103>.
5. **Driss Ait Omar**, Mohamed Baslam, Mourad Nachaoui & Mohamed Fakir, *Towards a New Approach to Rationalize the Operators' Choice in Telecommunication Networks*, International Journal of Control and Automation(IJCA), Volume 11, Issue 8, 2018.
<http://dx.doi.org/10.14257/ijca.2018.11.8.04>.

Communications dans les Conférences Internationales à Comité de Lecture

1. Hamid Garmani, **Driss Ait Omar**, Mohamed Baslam & Mohamed EL KAMILI , *UAV-based Ubiquitous Network Access : A Game Theoretic Analysis*, 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'19), December 09-13, 2019, Waikoloa, Hawaii, USA.
2. **Driss Ait Omar**, Mohamed El Amrani, Hamid Garmani, Mohamed Baslam & Mohamed Fakir , *An Efficient Online Cache Replacement Algorithm for Content Delivery Networks*, The 5th International Conference on Business Intelligence (CBI'19), April 17-19, 2019, Beni Mellal, Morocco.
3. **Driss Ait Omar**, Hamid Garmani, Mohamed El Amrani, Mohamed Baslam & Mohamed Fakir , *Bounded Rationality and Policy Impact in Emerging ISP-CP Relationships*, The 5th International Conference on Business Intelligence (CBI'19), April 17-19, 2019, Beni Mellal, Morocco.
4. **Driss Ait Omar**, Mohamed El Amrani, Mohamed Baslam & Mohamed Fakir, *A Game-Theoretic Approach for the Internet Content Distribution Chain*, The 6th Edition of the International Conference on NETWORKED SYSTEMS (NETYS 2018), May 9-11, 2018, Essaouira, Morocco.
5. **Driss Ait Omar**, Hamid Garmani, Mohamed El Amrani, Mohamed Baslam & Mohamed Fakir , *Analyzing the Customers Confusion in Telecommunication Networks : A Game Theoretic Approach*, The 4th International Conference on Business Intelligence (CBI'18), April 25-27, 2018, Beni Mellal, Morocco.
6. **Driss Ait Omar**, Hamid Garmani, Mohamed El Amrani, Mohamed Baslam & Mohamed Fakir , *When Bargaining Game is Key in the Internet Content Delivery Chain*, The 4th International Conference on Business Intelligence (CBI'18), April 25-27, 2018, Beni Mellal, Morocco.
7. **Driss Ait Omar**, M'hamed Outanoute, Mohamed Baslam, Mohamed Fakir & Belaid Bouikhalene, *Joint Price and QoS Competition with Bounded Rational Customers*, The 5th Edition of the International Conference on NETWORKED SYSTEMS (NETYS 2017), May 17-19, 2017, Marrakech, Morocco.

8. **Driss Ait Omar**, Mohamed Baslam, Mourad Nachaoui & Mohamed Fakir, *Customers and Rational Choice of Services Providers In Telecommunication Market : Resolution by Inverse Problems Theory*, The Third International Conference on Business Intelligence (CBI'17), March 29-31, 2017, Beni Mellal, Morocco.

Résumé

Dans la plupart des pays dans le monde, le marché des réseaux de communication est devenu plus en plus concurrentiel dans les dernières années à cause de la privatisation de secteur des télécommunications. Il permet aux nouveaux acteurs d'y apparaître en luttant contre les conditions monopolistiques naturelles. Selon les statistiques publiées en 2018 par l'union internationale de télécommunications, nous remarquons qu'il existe des utilisateurs qui ont plus d'un abonnement dans la téléphonie mobile et plus de 50% de la population mondiale bénéficie de services Internet. L'augmentation remarquable, de nombre d'utilisateurs abonnés dans la téléphonie mobile et dans les services Internet, a un effet positif sur le chiffre d'affaires marqué dans ce secteur de communication. Il est donc primordial d'étudier, modéliser et analyser l'impact de nombreux facteurs et paramètres sur les réseaux de communications. Dans cette thèse, nous avons utilisé la théorie des jeux et l'apprentissage automatique pour modéliser et analyser les interactions entre les acteurs des réseaux de communications.

Notre premier objectif dans ce travail de thèse est de proposer et d'étudier l'impact de la rationalité limitée des utilisateurs sur les politiques des acteurs dans les réseaux de télécommunication. Nous introduisons un modèle qui inclut le comportement des utilisateurs en utilisant le modèle du choix probabiliste de Luce. Nous formulons le jeu entre les ISPs et nous calculons les équilibres conjoints prix-QoS qui en résultent. Nous montrons que les fournisseurs de services Internet ont intérêt à avoir des utilisateurs irrationnels.

Dans ce secteur de télécommunication l'utilisateur d'aujourd'hui n'est plus celui de demain. Pour cela, nous proposons une modélisation qui va permettre à un fournisseur de service de prédire ses revenus dans un intervalle de temps en considérant la vitesse avec laquelle les utilisateurs changent leurs comportements et avec un facteur d'actualisation. A partir de cette étude, nous concluons que les fournisseurs de services doivent changer leurs stratégies de décisions si les utilisateurs arriveraient à collecter des informations sur le marché qui leur permettent la prise de bonnes décisions.

Dans cette thèse de doctorat, nous avons aussi étudié les relations techniques et économiques entre les acteurs de la chaîne de la distribution du contenu Internet. Nous considérons un écosystème composant de plusieurs fournisseurs de contenu CPs et plusieurs fournisseurs de réseaux de distribution du contenu CDNs, ainsi nous modélisons et analysons les interactions existantes entre eux. Nous avons soulevé l'existence du problème

de décision sur les paramètres communs entre les CPs et les CDNs, et nous proposons de le résoudre avec un jeu de négociation.

Finalement, nous élaborons un nouveau cadre d'utilisation de l'UAVs (Unmanned aerial vehicles) qui sont exploités récemment pour couvrir l'accès aux services de réseau pour une telle zone géographique (zones rurales, militaires, maritimes, . . .) avec un paramétrage basé sur la disponibilité, le prix d'accès et la qualité du service. Nous proposons une modélisation d'un jeu non coopératif entre les drones. Plus précisément, nous montrons l'existence et l'unicité de l'équilibre de Nash dans certaines conditions. L'analyse numérique effectuée à base d'un simple scénario permet aux drones d'apprendre la façon de choisir les paramètres et les contrôler pour arriver à la situation de l'équilibre.

Mots clés :

Qualité du Service, Tarification, Théorie des Jeux, Jeu non Coopératif, Jeu Coopératif, Équilibre de Nash, Meilleure Réponse, Prix de l'Anarchie, Fournisseurs de Service, Rationalité Limitée, Modèle de Luce, Fournisseurs de Contenu, Drones.

Abstract

In most countries around the world, the market for communication networks has become increasingly competitive in recent years due to the privatization of the telecommunications sector. It allows new actors to appear by fighting against natural monopolistic conditions. According to statistics published in 2018 by the International Telecommunication Union, we note that there are users who have more than one mobile phone subscription and more than 50% of the world population benefit from Internet services. The remarkable increase in the number of subscribers in mobile telephony and Internet services has a positive effect on the significant revenue in this telecommunications sector. It is therefore crucial to study, model and analyse the impact of many factors and parameters on communications networks. In this thesis, we used game theory and machine learning to model and analyze the interactions between actors in communication networks.

Our first objective in this thesis work is to propose and study the impact user bounded rationality on the strategies of actors in communication networks. We introduce a model that includes user behaviour using Luce's probabilistic choice model. We formulate the game between the ISPs and calculate the resulting joint price-QoS equilibrium. We show that Internet service providers have an interest in having irrational users.

In this telecommunications sector, the user of today is no longer the one of tomorrow. To do this, we propose a model that will allow a service provider to predict its revenues in a time interval by considering the speed with which users change their behaviors and with a discount factor. From this study, we conclude that service providers need to change their decision strategies if users are able to collect market information that allows them to make good decisions.

In this PhD thesis, we also studied the technical and economic relationships between the actors in the Internet content distribution chain. We consider an ecosystem composed of several CPs and several CDNs, so we model and analyze the existing interactions between them. We raised the existence of the deciding problem on the common parameters between CPs and CDNs, and we propose to solve it with a bargaining game.

Finally, we are developing a new framework for the use of UAVs (Unmanned aerial vehicles) that are recently operated to cover access to network services for such a geographical area (rural, military, maritime,...) with settings based on availability, access price

and service quality. We propose a model of a non-cooperative game between drones. More precisely, we show the existence and uniqueness of Nash's equilibrium under certain conditions. Numerical analysis based on a simple scenario offers to drones the opportunity to learn how to choose parameters and control them to reach the equilibrium situation.

Key Words :

QoS, Pricing, Beaconing, Game Theory, Non Cooperative Game, Bargaining Game, Nash equilibrium, Best Response, Price of Anarchy, Service providers, Bounded Rationality, Luce's Model, Content Providers, UAV.

Liste des Acronymes

CDN : Content Dilevery Networks

CP : Content Provider

ISP : Internet Service Provider

OTP : Opérateur de Télécommunications Publique

QoS : Quality of Service

SP : Service Provider

FAI : Fournisseur d'Accès à Internet

UAV : Unmanned Aerial Vehicle

NE : Nash Equilibrium

Table des matières

Liste des Publications	7
Résumé	9
Abstract	9
Liste des Acronymes	12
Introduction générale	19
Chapitre 1 Rappel sur la Théorie des Jeux et ses Applications	24
1.1 Introduction	24
1.2 Jeux Stratégiques	25
1.2.1 Définition du Jeu Stratégique	25
1.2.2 Représentations des Jeux	26
1.3 Typologie des Jeux	27
1.3.1 Jeux Coopératifs ou Non-coopératifs	27
1.3.2 Jeux Simultanés ou Séquentiels	27
1.3.3 Jeux Finis ou Infinis	28
1.3.4 Jeux à Somme Nulle	28
1.3.5 Jeux Répétés	28
1.3.6 Jeux à Information Complète ou Incomplète	28
1.3.7 Jeux à Information Parfaite ou Imparfaite	28
1.4 Équilibres des Jeux	29
1.4.1 Équilibre de Nash	29
1.4.2 Équilibre en Stratégies Dominantes	30
1.4.3 Jeux à Équilibres Multiples	32
1.4.4 Équilibres en Stratégies Mixtes	34
1.5 Rationalité et Équité	37
1.5.1 Rationalité Limitée	37
1.5.2 Équité et Bien-être Commun	38

1.6 Conclusion	39
--------------------------	----

Chapitre 2 Impact de la Rationalité Limitée sur la Concurrence entre les Fournisseurs de Services 40

2.1 Introduction	40
2.2 Travaux Connexes	41
2.3 Formulation du problème	43
2.3.1 Modélisation de Comportement des Clients	43
2.3.2 Modèle d'utilité	44
2.3.3 Le profit des utilisateurs dans les télécommunication Networks	45
2.4 Analyse du Jeu non-Coopératif	45
2.4.1 Jeu à QoS Fixe	46
2.4.2 Jeu à Prix Fixe	49
2.4.3 Jeu Conjoint du Prix et de la QoS	52
2.5 Apprentissage de l'équilibre de Nash	53
2.5.1 Algorithme de la Meilleure Réponse	53
2.5.2 Prix de l'Anarchie	54
2.6 Analyse Numérique	54
2.6.1 Impact du Degré d'Irrationalité des Utilisateurs sur le Prix à l'Équilibre	56
2.6.2 Influence du Coût Unitaire de la Bande Passante sur le Prix à l'Équilibre	57
2.6.3 Influence du Degré de Rationalité des Clients sur leurs Revenus	57
2.6.4 Influence de la Sensibilité des Clients sur leurs Revenus	58
2.6.5 Impact du Degré d'Irrationalité des Utilisateurs sur la QoS à l'Équilibre	59
2.6.6 Efficacité de l'Equilibre	60
2.7 Conclusion	60

Chapitre 3 Modélisation et Analyse de la Confusion dans les Réseaux de Communication 62

3.1 Introduction	62
3.2 Travaux Connexes	63
3.3 Modélisation du Problème	65
3.3.1 Modélisation de la Demande	66
3.3.2 Modélisation de l'Utilité	67
3.3.3 Ajout de Temporalité au Modèle	68

3.4	Formulation du Jeu	69
3.4.1	Définition de l'Equilibre de Nash	69
3.4.2	Analyser le Jeu sans Temporalité	70
3.4.3	Analyser le Jeu avec la Temporalité	73
3.5	Apprentissage de l'Equilibre de Nash	76
3.5.1	Meilleure Réponse Dynamique	76
3.5.2	Prix de l'Anarchie	76
3.6	Résultats Numériques	77
3.6.1	Cas sans Temporalité	77
3.6.2	Cas avec Temporalité	80
3.7	Conclusion	82
Chapitre 4 Fournisseurs de Réseaux de la Distribution du Contenu Internet et l'Amélioration de la QoS		83
4.1	Introduction	83
4.2	Modélisation du Problème	85
4.2.1	Modélisation de la Demande	86
4.2.2	Modèle de la Demande du CDN	87
4.2.3	Modèle de la Demande du CP	88
4.2.4	Utilité du Fournisseur CDN	88
4.2.5	Utilité du Fournisseur CP	89
4.3	Formulation de Jeux non Coopératifs	89
4.3.1	Jeu G1 à QoS fixe	90
4.3.2	Jeu G1 à Prix Fixe	92
4.3.3	Le jeu G2 avec QoContent fixe	93
4.3.4	Le Jeu G2 avec Prix Fixe	95
4.4	Apprentissage de l'Equilibre de Nash	96
4.4.1	La Meilleure Réponse Dynamique	96
4.4.2	Prix de l'Anarchie	97
4.5	Résultats Numériques	97
4.6	Conclusion	100
Chapitre 5 Analyse des Décisions des Drones		102
5.1	Introduction	102
5.2	Formulation du Problème	104
5.2.1	Probabilité de Service	104
5.2.2	Modélisation de la Demande	106

<i>TABLE DES MATIÈRES</i>	15
5.2.3 Fonction d'Utilité	107
5.3 Formulation et Analyse du Jeu non Coopératif	107
5.3.1 Jeu de Prix	108
5.3.2 Le jeu de Balisage	109
5.3.3 Jeu de QoS	111
5.4 Résultat Numériques	112
5.5 Conclusion	116
Conlusion Générale et Perspectives	120
Bibliographie	129

Liste des figures

1.1	Exemple de jeu de deux joueurs sous forme extensive	26
2.1	Convergence vers le point d'équilibre pour le jeu de prix	55
2.2	Convergence vers le point d'équilibre pour le jeu de la QoS	56
2.3	Convergence vers l'équilibre de Nash de prix et de la QoS pour le fournisseur de service 1.	56
2.4	Convergence vers l'équilibre de Nash de prix et de la QoS pour le fournisseur de service 2.	56
2.5	Les prix à l'Équilibre en fonction du Degré d'Irrationalité des Clients	57
2.6	Prix à l'équilibre en fonction du coût unitaire de la bande passante	58
2.7	Revenus des Clients en Fonction de Degré d'Irrationalité	58
2.8	Revenus des clients en fonction de sa sensibilité β	59
2.9	QoS à l'équilibre en fonction de degré d'irrationalité	59
2.10	Prix de l'Anarchie en Fonction du Degré d'Irrationalité	60
3.1	Architecture de Modèle	65
3.2	Convergence vers l'équilibre de Nash de prix	77
3.3	Convergence vers l'équilibre de Nash pour le jeu de QoS	78
3.4	Prix à l'Équilibre en Fonction de la Proportion de Clients Rationnels	78
3.5	QoS à l'Équilibre en Fonction de la Proportion de Clients Rationnels	79
3.6	Prix de l'Anarchie en Fonction de la Proportion de Clients Rationnels λ . .	79
3.7	Convergence vers le Point d'Équilibre de Nash	80
3.8	Convergence vers l'équilibre de Nash pour le jeu G_t à prix fixe	80
3.9	Prix à d'équilibre par rapport à la vitesse du changement de comportement ω	81
3.10	QoS à d'équilibre par rapport à la vitesse du changement de comportement ω	81
3.11	Prix de l'Anarchie par rapport à la vitesse du changement de comportement ω	82
4.1	Représentation des relations entre les acteurs de la chaîne de diffusion de contenu Internet. Les flèches simples représentent des transactions moné- taires. Les flèches en pointillés représentent la transmission des données du CP via CDN aux utilisateurs finaux.	86

4.2	Convergence vers l'Equilibre de Nash des Prix pour le Jeu G1	98
4.3	Convergence vers l'Equilibre de Nash des QoS pour le Jeu G1	98
4.4	Convergence vers l'Equilibre de Nash des Prix de Contenu pour le Jeu G2 .	98
4.5	Convergence vers l'Equilibre de Nash des Qualité de Contenu pour le Jeu G2	99
4.6	Le Prix de l'Anarchie en Fonction de f_{ij} dans le Jeu G1.	99
4.7	Le Prix de l'Anarchie en Fonction de f_{ij} dans le Jeu G2.	99
5.1	Calendrier du Cycle de Balisage.	105
5.2	Jeu de prix : Convergence à l'Equilibre de Nash.	112
5.3	Jeu de Qualité de Service : Convergence vers la QoS à l'Equilibre de Nash.	113
5.4	Jeu de la Période de Balisage : Convergence vers l'Equilibre de Nash. . . .	113
5.5	Evolution de prix à l'Equilibre de Nash en Fonction de la Période de Bali- sage ξ	114
5.6	Évolution de la Qualité de Service à l'Equilibre de Nash en Fonction de la Période de Balisage ξ	114
5.7	Evolution de la Période de Balisage à l'Equilibre de Nash par Rapport à λ .	115
5.8	Utilité en Fonction de ξ	115

Liste des tableaux

1.1	Jeux en prix du type dilemme du prisonnier (gains en millions de dollars) . . .	31
1.2	Jeu à deux joueurs ayant deux stratégies	32
1.3	Jeu de téléphone, un jeu de coordination avec deux équilibres de Nash . . .	33
1.4	Jeu de guerre sans équilibre en stratégies pures	35
2.1	Paramétrage utilisé pour les résultats numériques	55
3.1	Résumé des notations.	66

Introduction générale

Contexte Général

Les réseaux de télécommunications occupent une place plus importante dans notre vie quotidienne. Ils représentent un système indispensable pour l'innovation, la créativité et l'amélioration des opportunités économiques. L'accès à l'Internet via les téléphones mobiles fait partie de ce système, il contribue au développement des entreprises et à l'amélioration de la qualité de vie des personnes dans toute la planète. Aujourd'hui, les réseaux de communication sont utilisés depuis la simple transmission de messages jusqu'à l'activité à distance. Avec le nombre croissant d'activités qui reposent sur les systèmes de réseaux de communication, la demande pour une meilleure connectivité, une meilleure qualité de service et une sécurité accrue augmente comme prévu. Alors que les chercheurs s'efforcent constamment d'améliorer les performances et la sécurité des réseaux de communication. Les responsables politiques débattent de la manière dont l'infrastructure des réseaux de communication peut être mise à la disposition de tous les utilisateurs de manière équitable.

Internet est passé d'un système de communication simple, à petite échelle, mais robuste, transportant du trafic à faible débit de données à un réseau à très grande échelle et très complexe transportant du trafic hétérogène dans divers environnements. Son impact sur l'économie, l'influence sociale et culturelle est important. Ainsi, dans la conception de l'architecture future de l'Internet et le développement du protocole, il faut prendre en considération les aspects sociaux et économiques. Cependant, Depuis la commercialisation d'Internet en 1995 [39], de nombreuses technologies de l'information et de la communication ont vu le jour, ce qui a donné lieu à diverses activités commerciales en ligne. La montée en puissance de la communication quasi instantanée par courrier électronique (e-mail), messagerie instantanée, "appels téléphoniques" voix sur protocole Internet (VoIP), appels vidéo interactifs bidirectionnels et sites d'achat en ligne (Amazon, Netflix, eBay, Flipkart,...) a créé un énorme commerce électronique. Les technologies de l'information et de la communication ont un rôle économique central.

La commercialisation dans les réseaux de communications a enregistré une croissance rapide des investissements et l'apparition de nouveaux opérateurs de services, ce qui conduit à une concurrence forte entre eux [12]. Ce genre de système oligopolistique pro-

duit une méconnaissance de prix en terme de structure et de présentation. Cet événement rend les offres des opérateurs difficile à comparer et à interpréter, et c'est ce qu'on appelle la complexité tarifaire [78]. Elle repose non seulement sur la variété des tarifs (nature des tarifs – linéaires ou non –, nombre de combinaisons) associée à un ensemble de services, mais également sur la diversité des présentations de ces offres. Elle peut se caractériser, à travers le biais cognitif et informationnel qu'elle induit, par une modification de la capacité de choix des consommateurs relativement à un comportement rationnel et informé.

Les développements dans l'industrie des réseaux de communication ont conduit les opérateurs dans les réseaux de communication à adopter de nouvelles stratégies. Ces dernières ont comme objectif de différencier les services et assurer la disponibilité de la connectivité même dans quelques zones spécifiques (rurales, maritimes, militaires, ...) en exploitant la technologie de drones (UAV :Unmanned Aerial Vehicle).

La théorie des jeux est l'outil le plus adapté à l'étude et l'analyse des concurrences dans les problèmes des télécommunications. Des modèles de la théorie des jeux ont été développés et proposés au cours des dernière années [32, 69, 54, 55, 55, 4, 34, 13]. La théorie des jeux aide à prévoir la manière de prendre des décisions dans différentes situations. Elle a pour objectif principal d'éviter le conflit et de réaliser l'impartialité en étudiant l'interaction entre les différents décideurs. Le principal concept de la théorie des jeux est l'équilibre prouvé par Nash et nommé "équilibre de Nash", cette situation du jeu reflète la satisfaction de tous les joueurs et aucun n'a intérêt à changer sa décision sans prendre en considération les politiques de ses adversaires. Cette théorie est appliquée dans toutes nos contributions dans le cadre de cette thèse.

La disponibilité de la connectivité (l'accès aux services Internet) et les plans de tarifications avec un meilleur rapport QoS/prix dans les réseaux de communication sont objet à de nombreuses recherches importantes [42, 70, 69, 10, 50]. Dans les travaux [8, 27, 29, 87, 91, 52], les auteurs ont étudié, en utilisant les jeux non-coopératifs, l'interaction entre des acteurs égoïstes (Fournisseurs de services, Utilisateurs, Propriétaire du réseau, Fournisseurs de contenus, les fournisseurs de réseaux de distribution de contenu(CDN),...) cherchant à maximiser leurs propres bénéfices. Ainsi, les chercheurs ont formulé les problèmes de conflit entre différents acteurs dans des situations réalistes et ont analysé différentes caractéristiques des systèmes en situation d'équilibre.

Motivations et Objectifs

Au cours des deux dernières décennies, le cadre institutionnel et réglementaire du secteur des réseaux de communication a connu un changement radical et profond. Plusieurs

pays ont procédé à la privatisation totale ou partielle des opérateurs de télécommunications publiques (OTP) et à la refonte des réglementations relatives à l'accès aux marchés des télécommunications, à la fourniture de services aux usagers et aux systèmes de tarification. Cette réforme institutionnelle et réglementaire, généralement suscitée par l'évolution rapide des techniques de télécommunications et de la structure de la demande de services de télécommunications, a pour ainsi dire éliminé les conditions monopolistiques naturelles et donc permis à de nombreux exploitants de fournir profitablement ces services aux entreprises et aux consommateurs. Le nouvel environnement commercial et réglementaire, à son tour, influence notablement la structure et l'organisation du secteur.

Dans ce marché hautement concurrentiel des services Internet d'aujourd'hui, les fournisseurs de services, afin de survivre, devraient offrir à leurs clients une plus grande flexibilité dans leurs offres de qualité de service (QoS) / prix pour répondre à une variété de besoins des clients. Il est clair que toute solution réussie pour qu'un fournisseur de services reste sur le marché dépend non seulement de la prise en charge de technologies nouvelles et actualisées, mais aussi d'aspects économiques. Cependant, la tarification des services du réseau, même sans tenir compte de la différenciation de la qualité, est un problème difficile qui conduit à différentes situations conflictuelles. De nombreuses études ont tenté d'aborder ces questions avec ou sans prise en compte de la qualité de service différenciée.

Dans les réseaux de communications qui sont très concurrentiels comme ce que nous avons soulevé, il nous semble primordial de modéliser et analyser cette concurrence en proposant des modèles technico-économiques pour la définition des paramètres de décisions optimaux. En dépit de ces transitions progressives sur l'industrie des réseaux de communications, la concurrence entre fournisseurs d'accès aux services Internet en présence des paramètres sur le comportement des clients, n'a guère attiré l'attention. Ainsi, l'une des tâches les plus importantes dans les réseaux des télécommunications actuels et futurs consiste à définir un système de tarification approprié qui réponds aux besoins des consommateurs. Alors, il est fortement indispensable de proposer un modèle mathématique à base de la théorie de jeux pour optimiser les paramètres et vérifier les propriétés importantes telles que la rationalité limitée et la vitesse avec laquelle les clients changent leur comportement.

Dans la chaîne de la distribution de contenus, plusieurs acteurs dans les réseaux de communication peuvent contribuer à livraison des contenus Internet aux consommateurs. Dans ce processus, les CDNs jouent un rôle primordiale et ils permettent la sauvegarde des contenus dans des serveurs proches aux utilisateurs pour améliorer la qualité d'expérience (réduire la latence) et limiter les accès au réseau "Backhaul" (lutter contre le problème de congestion). Il est donc important d'étudier les relations technico-économiques entre les

acteurs de cette chaîne de livraison de contenus en prenant en considération l'existence de plusieurs CDNs commerciaux.

Au cours des dernières années l'industrie des réseaux de communications a exploité les drones (UAVs), comme stations de base, qui ont un grand potentiel pour accélérer le développement de la communication sans fil et améliorer la couverture réseau dans quelques zones spécifiques(rurales, maritimes, militaires,...). Il est donc indispensable de proposer des modèles mathématiques qui prennent en compte différents paramètres technico-économiques pour optimiser les stratégies des fournisseurs de services utilisant les UAVs comme outils qui offrent la connectivité aux utilisateurs.

L'objectif principal de cette thèse est de modéliser et analyser les interactions entre les différents acteurs dans les réseaux de communications. Plusieurs modèles sont alors étudiés et analysés à l'aide de différentes théories techniques, de méthodes d'analyse économique et d'algorithmes d'apprentissage appliqués dans la théorie des jeux. Nos contributions, dans cette thèse, portent sur la modélisation statique et dynamique de la rationalité limitée des utilisateurs et son impact sur les décisions des acteurs de réseaux de télécommunications. Ainsi, la modélisation des interactions pouvant exister entre les différents acteurs de la chaîne de la distribution du contenu Internet. Enfin, l'étude d'un nouveau cadre de l'utilisation des drones (UAVs) et la concurrence entre eux pour l'amélioration de la couverture réseaux dans quelques zones géographiques.

Plan de la Thèse

Le contenu principal de la thèse est divisé en cinq chapitres et une conclusion générale. Les préliminaires et la terminologie définies dans le premier chapitre vont permettre aux lecteurs de mieux positionner et comprendre les différentes contributions réalisées dans le cadre de ce travail. Le [premier chapitre](#) présente une introduction aux concepts de bases de la théorie des jeux. Nous définissons les différents types de jeux et leur typologie. Ensuite, nous introduisons le concept d'équilibre qui en résulte et nous expliquons comment procéder en présence de plusieurs situations d'équilibre. Nous expliquons les différentes mesures utilisées pour caractériser l'efficacité des équilibres. Ainsi, nous présentons l'algorithme de la meilleure réponse dynamique comme méthode d'apprentissage des équilibres d'une manière distribuée.

Dans le [deuxième chapitre](#), nous proposons d'étudier l'impact de la rationalité limitée des utilisateurs sur les politiques des acteurs dans les réseaux de télécommunications. Nous introduisons un modèle qui inclut le comportement des utilisateurs en utilisant le modèle du choix probabiliste de Luce et qui rend la fonction de la demande non linéaire.

Nous considérons différents modèles de jeux et obtenir l'équilibre conjoint prix-QoS qui en résultent. Nous montrons que les fournisseurs de services Internet ont intérêt à avoir dans le marché des clients irrationnels qui n'ont pas toutes les capacités à prendre la meilleure décision.

Dans le [troisième chapitre](#), nous traitons l'une des questions centrales sur la rationalité limitée ou un environnement confus s'il fallait considérer que le comportement de l'utilisateur d'aujourd'hui est toujours celui de demain. Cela nous amène à proposer une modélisation qui va permettre à un fournisseur de service de prédire ses revenus dans un intervalle de temps en considérant la vitesse avec laquelle les utilisateurs changent leurs comportements et avec un facteur d'actualisation. Nous concluons que les fournisseurs de services devront améliorer leurs services si les utilisateurs changent leurs comportements en collectant toutes les informations sur le marché leur permet la prise de bonnes décisions.

Ensuite, dans le [quatrième chapitre](#), nous étudions les relations techniques et économiques entre les acteurs de la chaîne de la distribution du contenu Internet. Nous considérons un écosystème composant de plusieurs fournisseurs de contenu CPs et plusieurs fournisseurs de réseaux de distribution du contenu CDNs, ainsi nous modélisons et analysons les interactions existantes entre eux. Après avoir soulevé le problème de décision sur les paramètres communs, nous proposons de reformuler les utilités des acteurs entrant en jeu de négociation (Bargaining Game). Nous concluons que cette solution permet de lutter contre les comportements de discrimination des acteurs dans les réseaux de communication.

Finalement, dans le [cinquième chapitre](#), nous traitons un nouveau cadre d'utilisation de l'UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) qui sont exploités récemment pour couvrir l'accès aux services de réseau pour une telle zone géographique (zones rurales, militaires, maritimes, . . .) avec un paramétrage basé sur la disponibilité, le prix d'accès et la qualité du service. Nous proposons une modélisation d'un jeu non coopératif entre les drones. Plus précisément, nous montrons l'existence et l'unicité de l'équilibre de Nash dans certaines conditions. L'analyse numérique effectuée à base d'un simple scénario offre des perspectives encourageantes sur la façon de choisir les paramètres de décisions et de les contrôler pour arriver à la situation de l'équilibre.

Rappel sur la Théorie des Jeux et ses Applications

1.1 Introduction

La théorie des jeux est une branche des mathématiques appliquées et est un outil d'analyse des comportements humains. Le cadre de base de la théorie des jeux a été introduit en 1944 dans le livre "Theory of Games and Economic Behavior" par John von Neumann et Oskar Morgenstern [98].

La théorie des jeux permet de décrire et d'analyser de nombreuses relations économiques et sociales sous la forme de jeux stratégiques. Jusqu'à présent, elle est largement utilisée dans de nombreux domaines principalement dans l'économie, ainsi que l'informatique, la biologie, la politique et de nombreux autres domaines. La théorie des jeux est une description efficace des interactions stratégiques. Elle tente de modéliser le comportement des individus dans des situations stratégiques, dans lesquels la réussite d'un individu à faire des choix dépend des choix des autres. La théorie des jeux améliore la compréhension des conflits en élaborant des théories, des modèles mathématiques et des abstractions qui servent à expliquer la nature et les résultats des conflits.

Dans la théorie des jeux, il y a certaines hypothèses de base qui sont souvent utilisés pour faciliter la construction de modèles maniables pour des situations réelles. Premièrement, on suppose que chaque individu dans le jeu a un ordre défini de préférences sur tous les résultats d'une situation donnée. Ces préférences prennent la forme d'une fonction d'utilité ou de paiement. Deuxièmement, les participants dans les jeux sont parfois considérés comme rationnels. Cela signifie qu'ils agissent toujours de façon à maximiser leurs gains, ils seront toujours capables de penser à tous les résultats possibles et en choisir l'action qui se traduira par le résultat le mieux possible.

Dans ce chapitre, nous présentons brièvement certains concepts et définitions de la théorie des jeux. Nous commençons par définir la notion du jeu stratégique, ses différentes représentations et les différents types des jeux. Nous distinguons les jeux coopératifs et

non-coopératifs selon la possibilité de formation des coalitions entre les joueurs. Selon l'ordre de prise de décision défini dans un jeu, nous distinguons les jeux séquentiels des jeux simultanés. Un jeu peut être fini ou infini selon les espaces des stratégies de chaque joueur et peut être un jeu répété plusieurs fois ou non. Nous signalons qu'un jeu est caractérisé par la qualité et la quantité d'informations dont les joueurs disposent. Ainsi, nous distinguons les jeux à information complète et incomplète et les jeux à information parfaite et imparfaite. Puis nous montrons que la théorie des jeux permet de prédire les équilibres d'un jeu, qui sont des situations dans lesquelles aucun joueur n'a intérêt à modifier son comportement compte tenu des comportements de ses concurrents. Finalement, nous discutons les concepts de rationalité et d'équité qui se déterminent par la quantité et la qualité d'informations que possèdent les joueurs sur le jeu et leur degré de coopération.

1.2 Jeux Stratégiques

Des acteurs sont engagés dans un jeu stratégique quand l'utilité et les gains de chacun sont affectés non seulement par les actions qu'il entreprend mais aussi par les actions de ses rivaux. Par exemple, le jeu d'échecs est clairement un jeu stratégique parce que la victoire ou la défaite de l'un des joueurs dépend autant de ses propres choix tactiques que de ceux de son rival. De nombreuses situations économiques se ramènent à des jeux stratégiques. Par exemple, les profits d'une firme ne dépendent pas de ses seuls choix en matière de prix, mais aussi des prix annoncés par ses concurrents. De même, les conflits politiques ont souvent les caractéristiques d'un jeu stratégique.

1.2.1 Définition du Jeu Stratégique

Un jeu stratégique est un ensemble de règles qui encadre ou contraint le comportement des joueurs et qui détermine les gains des acteurs sur la base des actions entreprises [72, 77]. Selon cette terminologie, un jeu stratégique suppose une définition claire des règles de comportement des joueurs. Premièrement, on doit savoir qui sont les joueurs et si la chance ou le hasard est présent dans le jeu (comme dans les jeux des cartes). Deuxièmement, l'ordre dans lequel les joueurs effectueront leurs choix doit être précisé. Nous devons savoir qui joue le premier, qui joue le second et ainsi de suite. Nous devons aussi savoir quels sont les choix possibles des joueurs. Enfin, on doit préciser l'utilité ou le gain que retirera chaque joueur à la fin du jeu pour chaque combinaison de choix possibles.

1.2.2 Représentations des Jeux

Un jeu est défini par l'ensemble des joueurs, l'ensemble des stratégies possibles et la spécification des paiements ou des utilités des joueurs pour chaque combinaison de stratégies. Les jeux sont généralement présentés sous la forme de fonctions caractéristiques, sous forme extensive ou sous forme normale.

1.2.2.1 Arbre du Jeu ou Forme Extensive

Les règles du jeu et les gains contingents peuvent être représentés par ce que les théoriciens des jeux appellent un arbre. Ce dernier offre une description détaillée des règles du jeu et est aussi appelé la forme extensive du jeu. Figure 1.1 illustre un exemple de jeu de deux joueurs sous forme d'un arbre.

Un jeu sous forme extensive est défini par :

- Un ensemble N de joueurs ;
- Un arbre composé de :
 - Un ensemble de nœuds représentant les coups ;
 - Un ensemble de branches représentant les alternatives à chaque coup ;
 - Une fonction de nommage qui indique à chaque nœud quel est le joueur qui doit jouer ;
 - Une fonction de valuation qui associe à chaque nœud terminal un vecteur de nombres représentant les gains de chacun des joueurs.
- Une partition des nœuds en un ensemble d'ensembles d'informations représentant les croyances (imparfaites) des joueurs.

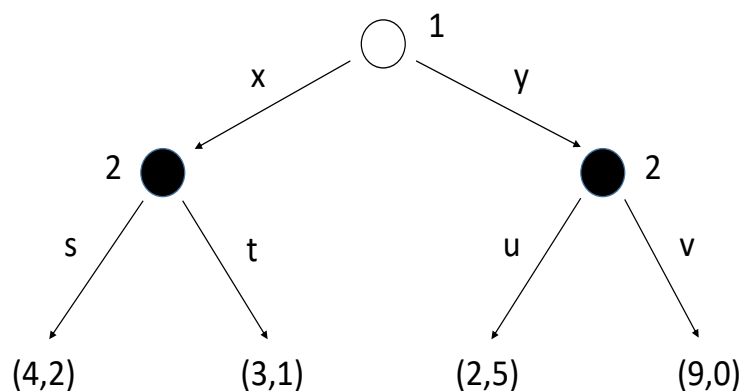


FIGURE 1.1 – Exemple de jeu de deux joueurs sous forme extensive

1.2.2.2 Description du Jeu sous sa Forme Normale

Lorsqu'un jeu implique de multiples joueurs et de multiples choix, l'arbre peut devenir complexe à représenter. Pour éviter de telles difficultés, il est courant de simplifier la présentation du jeu en spécifiant la stratégie de chaque joueur. Par stratégie, nous entendons un plan d'action complet pour chaque joueur spécifiant ce que fera ce dernier à chaque noeud de l'arbre et face à chaque situation pouvant survenir au cours du jeu.

Plus précisément, la description d'un jeu sous sa forme normale se compose de trois éléments :

- Un ensemble de joueurs $N = \{1, \dots, N\}$,
- Un ensemble de stratégies $S = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_N$,
- Un ensemble de gains $U = \{U_1, U_2, \dots, U_N\}$.

1.3 Typologie des Jeux

En théorie des jeux, on peut classifier les jeux en plusieurs catégories en fonction de leurs descriptions ou de leurs approches de résolution.

1.3.1 Jeux Coopératifs ou Non-coopératifs

Dans tous les modèles théoriques des jeux, l'entité de base est le joueur. Un joueur peut être interprété comme un individu ou un groupe de personnes prenant une décision. Une fois que nous avons défini l'ensemble des joueurs, nous pouvons distinguer deux types de modèles : ceux dans lesquels la coalition entre les joueurs est possible afin d'obtenir de meilleurs résultats pour les membres de la coalition et ceux dans lesquels les joueurs n'ont pas cette possibilité. Les modèles du premier type sont appelés "coopératifs", tandis que ceux du second type sont appelés "non-coopératifs".

Exemple : La belote à 4 est un jeu coopératif tandis que le rami est un jeu non-coopératif.

1.3.2 Jeux Simultanés ou Séquentiels

Dans un jeu simultané, les joueurs décident simultanément leurs stratégies. Tandis que dans un jeu séquentiel, un ordre des décisions peut être spécifié et un joueur peut décider de sa stratégie conditionnellement à ce qu'ont joué les autres précédemment.

Exemple : Le jeu pierre-papier-ciseaux est un jeu simultané, tandis que le jeu de go est un jeu séquentiel.

1.3.3 Jeux Finis ou Infinis

Lorsque l'ensemble des stratégies de chacun des joueurs est fini, on parle d'un jeu fini et dans le cas contraire on dit que le jeu est infini.

Exemple : Le jeu pierre-papier-ciseaux est un jeu fini. Un jeu où on choisit au hasard un entier naturel non nul est un jeu infini.

1.3.4 Jeux à Somme Nulle

Un jeu à deux joueurs est dit à somme nulle ou strictement compétitif si l'intérêt de l'un des joueurs est strictement opposé à l'intérêt de l'autre.

Exemple : Le jeu d'échecs est un jeu à somme nulle car la victoire de l'un des joueurs est égale à la défaite de l'autre.

1.3.5 Jeux Répétés

Dans certains jeux, la répétition du jeu plusieurs fois avec connaissance des résultats intermédiaires, change souvent son déroulement. Il peut être utile, par exemple, de prendre ponctuellement le risque de perdre pour voir ou pour tester les autres joueurs et pour mettre en place des stratégies de communications par les stratégies jouées. Un tel jeu qui consiste à une répétition d'un jeu de base est appelé jeu répété.

1.3.6 Jeux à Information Complète ou Incomplète

On dit qu'un jeu est à information complète si chaque joueur connaît lors de la prise de décision :

- Ses possibilités d'action,
- Les possibilités d'action des autres joueurs,
- Les gains résultants de ses actions,
- Les motivations des autres joueurs.

Si l'une de ces conditions n'est pas vérifiée, on dit que le jeu est à information incomplète ou jeu bayésien.

1.3.7 Jeux à Information Parfaite ou Imparfaite

Un jeu est dit à information parfaite si chaque joueur a une connaissance parfaite de toute l'histoire du jeu. Dans le cas contraire, on dit que le jeu est à information imparfaite.

1.4 Équilibres des Jeux

L'analyse d'un jeu permet de prédire l'équilibre qui émergera si les joueurs sont rationnels. Nous entendons par équilibre un état ou une situation dans lequel aucun joueur ne souhaite modifier son comportement compte tenu du comportement des autres joueurs. En d'autres termes, un équilibre est une combinaison de stratégies telle qu'aucun des joueurs n'a d'incitation à changer sa stratégie compte tenu des stratégies des autres joueurs. Une fois que l'équilibre est atteint dans un jeu (peu importe la manière dont il a été obtenu), il n'y a aucune raison de le quitter.

Nous savons qu'un équilibre est constitué d'une combinaison de choix stratégiques (un choix stratégique par joueur) et nous savons qu'une fois les choix arrêtés, aucune modification n'interviendra. C'est à dire qu'aucun joueur ou groupe de joueurs n'aura d'incitation à modifier ses actions s'il suppose que ses rivaux ne modifieront pas non plus les leurs. Nous parlons ici des situations dans lesquelles chaque joueur arrête seul ses choix stratégiques sans consulter les autres joueurs. De tels jeux sont appelés *jeux non coopératifs*. Pour les jeux coopératifs, on utilise un concept d'équilibre différent. Ainsi, pour déterminer les équilibres d'un jeu non coopératif, nous considérons uniquement les incitations des joueurs prises individuellement, et non pas les incitations des groupes de joueurs à modifier leurs comportements conjointement étant donné le comportement des joueurs restants.

1.4.1 Équilibre de Nash

L'équilibre de Nash est un concept fondamental en théorie des jeux. Il doit son nom au mathématicien et économiste John F. Nash, prix Nobel d'économie en 1994, qui l'introduisit en 1951. Ce concept décrit une issue dans laquelle aucun joueur ne souhaite modifier son comportement (ou sa stratégie) étant donné le comportement (ou la stratégie) de ses rivaux. Nous pouvons définir un équilibre de Nash d'une façon formelle.

Soient un jeu non-coopératif à n joueurs et $S = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$ l'ensemble des stratégies formé par les ensembles des choix stratégiques S_i de tous les joueurs. Soit $s^* = (s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*)$ une combinaison de choix stratégiques de ces n joueurs où $s_1^* \in S_1$ est le choix stratégique du joueur 1, $s_2^* \in S_2$ le choix stratégique du joueur 2 et ainsi de suite. De plus, soit $u_i(s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*)$ le gain du joueur i lorsque s^* est sélectionnée, où i peut être l'indice de n'importe quel joueur ($i = 1, 2, \dots, n$). Nous pouvons maintenant donner une définition formelle de l'équilibre de Nash : une combinaison de choix stratégiques $s^* = (s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*)$ est un *équilibre de Nash* si $u_i(s_1^*, \dots, s_i^*, \dots, s_n^*) \geq u_i(s_1^*, \dots, s_i, \dots, s_n^*)$

pour tout s_i dans S_i et tout joueur $i = 1, 2, \dots, n$.

Pour comprendre cette définition, $u_i(s_1^*, \dots, s_i^*, \dots, s_n^*)$ est le gain du joueur i quand il choisit s_i^* et que tous les autres font un choix conforme à s^* . Alors que $u_i(s_1^*, \dots, s_i, \dots, s_n^*)$ indique le gain du joueur i quand il dévie de s_i^* et choisit une autre stratégie s_i , alors que les $n - 1$ autres joueurs font un choix conforme à s^* . Les conditions d'équilibre nous disent qu'aucun joueur i ne peut bénéficier d'une telle déviation et ce quelle que soit la stratégie qu'il choisit dans son ensemble de stratégies S_i . En d'autres termes, si nul ne peut bénéficier d'une déviation de s^* , alors nul ne le fera, ce qui est bien la preuve que s^* est un équilibre.

1.4.2 Équilibre en Stratégies Dominantes

Pour comprendre le concept d'équilibre de Nash, nous devons supposer initialement que les joueurs ont déjà arrêté une certaine configuration de choix stratégiques. Nous considérons alors uniquement les déviations unilatérales (individuelles) possibles de cette configuration dans laquelle chaque joueur envisageant de dévier suppose que tous les autres n'ont pas ce dessein. Dans ces circonstances, le concept d'équilibre de Nash nous dit qu'aucun joueur n'aura d'incitation à dévier étant donné la configuration stratégique. Ce que le concept d'équilibre ne nous dit pas c'est comment ou pourquoi une certaine configuration de choix stratégiques est arrêtée initialement.

1.4.2.1 Exemple

Pour certains jeux cependant, nous pouvons comprendre pourquoi un équilibre particulier émerge. Considérons la matrice de la table 1.1 qui applique le célèbre **dilemme du prisonnier** à la concurrence en prix que se livrent les firmes en oligopole. Dans l'exemple présent, les firmes en question sont X et Y. Supposons que X et Y construisent des voitures presque identiques si bien que le prix demeure la seule variable que le consommateur prend en compte lors de l'achat d'une voiture. Le premier chiffre dans chaque case de la matrice est le profit de X et le second celui de Y. Chaque firme a deux stratégies possibles pour la tarification de ses voitures : fixer un prix élevé ou un prix bas. La matrice des gains indique les conséquences monétaires de ces différentes stratégies de prix pour chacune des firmes.

Remarquons que si X et Y fixent toutes les deux un prix élevé, nous sommes dans une situation collusive qui nuit au consommateur, chaque firme obtenant un profit élevé de 50 millions de dollars. Cependant si une firme fixe un prix élevé, alors l'autre firme peut obtenir un profit encore plus grand en baissant son prix (en déviant de la stratégie de

prix élevé). Cette dernière enlève du fait à son rival la quasi-totalité du marché et obtient un profit de 70 millions de dollars ne laissant à son rival qu'un profit de 10. Si les deux firmes fixent un prix bas, elles se partagent à parts égales un marché plus étendu. Mais compte tenu du faible prix de vente, elles ne gagnent chacune que 30 millions de dollars.

$X \setminus Y$	PRIX BAS	PRIX ÉLEVÉ
PRIX BAS	30 ; 30	70 ; 10
PRIX ÉLEVÉ	10 ; 70	50 ; 50

TABLE 1.1 – Jeux en prix du type dilemme du prisonnier (gains en millions de dollars)

Dans la table 1.1, la seule combinaison de stratégies conduisent à un équilibre de Nash est celle dans laquelle X et Y fixent un prix bas et obtiennent un profit de 30 millions de dollars chacun. Si l'une des firmes s'attend à ce que l'autre fixe un prix bas, sa meilleure réponse est aussi de fixer un prix bas. C'est la seule combinaison de stratégies qui conduit à un équilibre, malgré le fait que les deux firmes auraient plutôt un intérêt commun à fixer des prix élevés (leur profit s'élèverai à 50 millions de dollars). Mais la combinaison des stratégies de prix élevés incite chacune des firmes à tricher ou à dévier.

L'équilibre en prix bas peut être justifié d'une autre manière. Nous pouvons en effet remarquer que fixer un prix bas est le meilleur choix pour chaque firme quel que soit le choix attendu de son rival. Examinons le décision de X (Y étant dans une situation symétrique, le même raisonnement s'applique pour elle). Si X s'attend à ce que Y fixe un prix élevé, sa meilleure réponse est de fixer un prix bas car elle gagne 70 millions au lieu de 50 millions de dollars (gain d'une stratégie de prix élevé). D'autre part, si X s'attend à ce que Y fixe un prix bas, sa meilleure réponse est encore de fixer un prix bas. En ne choisissant pas un prix élevé, il évite ainsi de perdre de l'argent : son gain est de 30 millions au lieu de 10 millions de dollars. Clairement X est toujours mieux en fixant un prix bas quelle que soit la stratégie attendue de Y.

Quand la stratégie d'un joueur est meilleure réponse face à toutes les stratégies possibles de ses rivaux, on dit que c'est une stratégie dominante (cette stratégie domine toutes les autres stratégies du joueur). Dans l'exemple précédent, les deux firmes ont une stratégie dominante qui consiste à fixer un prix bas. L'équilibre de ce jeu est alors appelé **équilibre en stratégie dominante**.

1.4.2.2 Résolution des Jeux par Élimination des Stratégies Dominées

Un joueur rationnel ne doit jamais utiliser une **stratégie dominée**, c'est-à-dire une stratégie qui est dominée en terme de gains par au moins une autre de ses stratégies face

à toutes les stratégies possibles de ses rivaux. Lorsque nous sommes opposés à un joueur rationnel, nous pouvons supposer que ce dernier n'utilisera jamais une telle stratégie ; nous pouvons donc l'éliminer de son ensemble de stratégies possibles. Une manière de déterminer les équilibres d'un jeu consiste à éliminer en premier toutes les stratégies dominées puis de chercher dans le jeu les équilibres. Pour illustrer cette méthode, considérons la table 1.2 . Cette dernière décrit les gains d'un jeu à deux joueurs qui ont chacun deux stratégies possibles (le premier chiffre dans chaque case est le gain du joueur 1 et le second celui du joueur 2).

<i>Joueur1</i> \ <i>Joueur2</i>	Stratégie A	Stratégie B
Stratégie a	3 ; 0	4 ; 0
Stratégie b	6 ; 3	0 ; 2

TABLE 1.2 – Jeu à deux joueurs ayant deux stratégies

Dans ce jeu, la stratégie *A* du joueur 2 domine faiblement sa stratégie *B* car sa stratégie *A* est équivalente à sa stratégie *B* lorsque le joueur 1 a opté pour la stratégie *a*, et strictement meilleure lorsque le joueur 1 a opté pour la stratégie *b*. Si le joueur 1 pense que le joueur 2 est rationnel, il s'attend à ce que ce dernier ne recoure jamais à sa stratégie *B*. Le joueur 1 éliminera donc la stratégie *B* de l'ensemble des stratégies possibles du joueur 2. Face à la seule stratégie *A* du joueur 2, le joueur 1 a le choix entre la stratégie *a* associée à un gain de 4 et la stratégie *b* associée à un gain de 6. Si ce dernier est rationnel, il optera pour la stratégie *b* car après élimination de la stratégie dominée de joueur 2, sa stratégie *b* domine sa stratégie *a*. En éliminant les stratégies dominées (même faiblement dominées), nous avons déterminé l'équilibre de ce jeu et les gains associés (6; 3).

1.4.3 Jeux à Équilibres Multiples

Tous les jeux n'ont pas des équilibres qui peuvent être déterminés par simple élimination des stratégies dominées. De plus, certains jeux sont caractérisés par des équilibres multiples, c'est-à-dire de multiples combinaisons de choix stratégiques satisfaisant à la définition d'un équilibre de Nash.

1.4.3.1 Exemple : jeu de coordination à équilibres multiples

Considérons le jeu de coordination présenté dans la table 1.3 et dont l'histoire peut être la suivante.

A la suite d'une série d'incidents techniques, la plupart des centraux téléphoniques

d'une grande ville comme Paris sont hors service. France Télécom est alors dans l'obligation de rationner l'accès au réseau en limitant la durée des appels téléphoniques. La règle serait la suivante : si un appel dépasse cinq minutes, France Télécom coupe la ligne. Pour continuer la conversation, un des deux interlocuteurs doit rappeler l'autre. Nous sommes confrontés au problème suivant : lequel des deux interlocuteurs doit rappeler ? Celui qui a appelé à l'origine ou celui qui a été appelé ?

Si l'appel téléphonique est coûteux, nous pouvons supposer que chaque personne préfère être appelé. Nous avons deux stratégies pour chaque joueur : *appeler* ou *attendre*. Si les deux attendent, la conversation téléphonique ne peut se poursuivre et le gain de chaque joueur est nul. Si les deux tentent de se rappeler, chacun tombe sur la tonalité occupée. Le résultat est aussi un gain nul. Cependant si un des joueurs appelle et l'autre attend alors le gain est de 3 pour celui qui appelle et de 6 pour celui qui est appelé. Ce dernier reçoit un gain supérieur parce qu'il ne supporte pas le coût de l'appel. Quel est l'équilibre d'un tel jeu ? En d'autres termes qui doit appeler et qui doit attendre ? Pour répondre à cette question, regardons plus attentivement la table 1.3.

<i>Joueur1</i> \ <i>Joueur2</i>	Attendre	Appeler
Attendre	0 ; 0	6 ; 3
Appeler	3 ; 6	0 ; 0

TABLE 1.3 – Jeu de téléphone, un jeu de coordination avec deux équilibres de Nash

Il est clair que l'intérêt des deux joueurs est de coordonner leurs stratégies afin que l'un choisisse la stratégie *attendre* et l'autre la stratégie *appeler*. Seule une telle coordination permet aux deux joueurs d'obtenir un gain positif. Cependant, ils peuvent ne pas être d'accord sur la façon d'y parvenir. Tous les deux préfèrent la stratégie *attendre* qui rapporte le gain 6 (le gain de la stratégie *appeler* étant seulement 3).

Dans ce jeu nous avons deux équilibres de Nash. Le premier correspond à la situation où le joueur 1 choisit la stratégie *attendre* et le joueur 2 la stratégie *appeler*, le second à la situation dans laquelle le joueur 1 choisit la stratégie *appeler* et le joueur 2 la stratégie *attendre*. Pour vérifier que ces deux paires de stratégies sont des équilibres de Nash, considérons la situation dans laquelle le joueur 1 choisit la stratégie *attendre* et le joueur 2 la stratégie *appeler*. Dans ce cas, si le joueur 1 pense que le joueur 2 va choisir la stratégie *appeler*, le joueur 1 a intérêt à sélectionner la stratégie *attendre* car elle lui donne un gain de 6 (au lieu de 0 si il choisissait la stratégie *appeler*). De même, si le joueur 2 pense que le joueur 1 va choisir la stratégie *attendre*, le joueur 2 a intérêt de sélectionner la stratégie *appeler* car le gain de 3 associé à ce choix est supérieur au gain 0 associé à la stratégie

attendre. Le même raisonnement est valable lorsque le joueur 1 choisit la stratégie *appeler* et que le joueur 2 choisit la stratégie *attendre*.

Cet exemple montre qu'un jeu peut comporter plusieurs équilibres. Initialement, la théorie des jeux ne se préoccupait pas de savoir lequel de ces équilibres allait être sélectionné par les joueurs. Depuis quelques années, la théorie des jeux s'est ouverte à des **concepts de raffinement** qui permettent de réduire le nombre des équilibres. Par exemple, les *équilibres de sous jeu parfait* ou les *équilibres robustes à la renégociation* appartiennent à ces concepts de raffinements.

Les expériences à partir de jeux de coordination ont donné des résultats intéressants. Il serait naturel de penser que les joueurs dans un tel jeu choisissent toujours le meilleur équilibre, mais les résultats expérimentaux indiquent que tel n'est toujours pas le cas [95]. Ces jeux avaient plusieurs équilibres de Nash qui pouvaient être unanimement rangés du meilleur au pire. Ces études ont montrés contre toute attente que les joueurs ne convergent pas vers le meilleur équilibre quand le jeu est répété un certain nombre de fois. Au contraire, il ressortait que l'issue apparue au premier coup tendait à se perpétuer aux coups suivants. Le choix de l'équilibre de coordination dépendait plus de l'histoire passée du jeu que d'une réflexion sur les avantages en terme de gains des différents équilibres. Ce résultat va à l'encontre des hypothèses en théorie des jeux selon lesquelles l'issue d'un jeu dépend de ses propriétés stratégiques et de sa matrice de gains et non des histoires qui auraient pu apparaître au cours du jeu.

1.4.4 Équilibres en Stratégies Mixtes

Tous les jeux ne comportent pas des équilibres de Nash aussi évidents que dans les jeux étudiés précédemment. Considérons l'exemple suivant qui illustre un jeu avec équilibre en stratégies mixtes.

1.4.4.1 Exemple : Jeu sans Équilibre en Stratégies Pures

Nous supposons que deux généraux sont opposés dans une bataille. Chaque général a deux stratégies à sa disposition : attaquer ou battre en retraite. Les gains dans la table 1.4 représentent la satisfaction que les deux armées peuvent tirer des quatre combinaisons possibles de choix stratégiques. Par exemple, si le général 1 se retire et que le général 2 attaque, il n'y aura pas de bataille et les deux armées recevront un gain de 6 chacune. Nous supposerons qu'il y a des raisons stratégiques à chaque gain, mais nous ne nous étendrons pas sur les explications car elles ne présentent pas un intérêt direct.

Général 1 \ Général 2	Attaquer	Battre en retraite
Attaquer	2 ; 3	8 ; 0
Battre en retraite	6 ; 6	5 ; 8

TABLE 1.4 – Jeu de guerre sans équilibre en stratégies pures

A première vue, la paire de choix stratégiques qui fournit le gain $(6, 6)$ semble être un candidat à l'équilibre de Nash. Cependant, ce jeu n'a pas d'équilibre de Nash en stratégies pures. Par stratégie pure, nous entendons une règle spécifiant l'action (ou les actions) à entreprendre - dans ce cas attaquer ou battre en retraite. Quand nous prétendons que le jeu décrit ici n'a pas d'équilibre de Nash en stratégies pures, nous voulons dire qu'il n'existe pas de paire de stratégies (une pour le général 1 et une pour le général 2) qui puisse constituer un équilibre du jeu.

Par exemple, prenons la paire de stratégies associée aux gains $(6, 6)$ (le général 1 choisit de se retirer et le général 2 d'attaquer). Ce n'est pas un équilibre de Nash car l'un des généraux a une incitation à dévier de sa stratégie initiale. Si le général 1 choisit de battre en retraite, la meilleure réponse pour le général 2 est aussi de battre en retraite afin d'obtenir un gain de 8. Ce gain est supérieur au gain de 6 obtenu en attaquant. Cependant, cette nouvelle paire de stratégies (battre en retraite, battre en retraite) n'est pas non plus un équilibre de Nash. Les gains associés à cette paire stratégique sont alors $(5, 8)$. Le général 1 en déviant de sa stratégie de retraite peut faire mieux que 5 en terme de gain. Si il attaque l'armée du général 2 qui bat en retraite, il reçoit un gain de 8. Les deux autres paires de stratégies (attaquer, battre en retraite), et (attaquer, attaquer) associées respectivement aux gains $(8, 0)$ et $(2, 3)$ ne mènent pas non plus à des équilibres de Nash.

Il existe une autre méthode pour obtenir un équilibre de Nash dans des jeux du type de celui décrit dans l'exemple précédent. Il suffit d'élargir la définition d'une stratégie et d'y inclure non seulement les actions pures (telle que attaquer ou battre en retraite) mais aussi les probabilités de choisir l'une ou l'autre de ces actions. Par exemple, supposons qu'au lieu de simplement attaquer ou battre en retraite, le général 1 décide d'attribuer une probabilité positive à ces deux alternatives. Par conséquent, il se retirera avec une probabilité p et attaquera avec une probabilité $(1 - p)$. De même, supposons que le général 2 se retire avec une probabilité q et attaque avec une probabilité de $(1 - q)$. En élargissant l'espace de choix des généraux, c'est à dire en leur permettant de recourir à des probabilités, nous sommes en présence de stratégies mixtes - stratégies qui définissent les probabilités avec lesquelles les joueurs choisissent chacune de leurs actions ou de leurs

stratégies pures (ici attaquer ou battre en retraite).

L'ensemble des stratégies mixtes possibles dans notre exemple est l'ensemble de tous les p vérifiant $0 \leq p \leq 1$ et l'ensemble de tous les q vérifiant $0 \leq q \leq 1$. Si les joueurs ont n stratégies pures, une stratégie mixte est une distribution de probabilité sur toutes ces stratégies ; c'est à dire l'ensemble des vecteurs $p = (p_1, \dots, p_n)$ tels que $p_1 \geq 0, p_2 \geq 0, \dots, p_n \geq 0$ et $p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$.

Revenons à l'exemple précédent et supposons que le général 2 choisisse de battre en retraite avec la probabilité q et d'attaquer avec la probabilité $(1 - q)$. Si le général 1 choisit de battre en retraite, son gain espéré d'après la table 1.4 est alors égal à $q \times 5 + (1 - q) \times 6 = 6 - q$.

La valeur espérée d'une stratégie est le gain que l'on s'attend à recevoir pondéré par les probabilités de choix de l'autre joueur. Notons que si $q = 1$, le général 2 décide de toujours battre en retraite. Dans ce cas si le général 1 bat en retraite, il recevra un gain certain de 5. Si $q = 0$, le général 2 décide de toujours attaquer. En se retirant, le général 1 recevra un gain certain de 6. Quand $0 \leq q \leq 1$, le général 1 recevra en se retirant soit un gain de 5 avec une probabilité de q , soit un gain de 6 avec une probabilité de $(1 - q)$. De même, le gain espéré de la stratégie d'attaque du général 1 s'écrit $q \times 8 + (1 - q) \times 2 = 2 + 6q$.

Maintenant si le général 2 choisit q tel que ce choix rende le gain espéré d'une des stratégie pures du général 1 supérieur au gain espéré de l'autre, alors cette meilleure stratégie pure en terme de gain espéré sera choisie avec une probabilité de 1 par le général 1. Par exemple, supposons que le général 2 choisisse la stratégie mixte $q = \frac{1}{2}$ et $(1 - q) = \frac{1}{2}$. Si le général 1 choisit de se retirer, son gain espéré est de $\frac{1}{2} \times 5 + \frac{1}{2} \times 6 = 5.5$. Si il choisit d'attaquer, son gain espéré est de $\frac{1}{2} \times 8 + \frac{1}{2} \times 2 = 5$.

Clairement si le général 2 choisit la stratégie mixte $q = \frac{1}{2}$ et $(1 - q) = \frac{1}{2}$, alors la meilleure réponse du général 1 est la retraite. Sachant cela, le général 2 abandonnera sa stratégie mixte et battra lui aussi en retraite. Ainsi une situation dans laquelle le général 2 utilise la stratégie mixte $q = \frac{1}{2}$ et $(1 - q) = \frac{1}{2}$ ne peut constituer un équilibre en stratégies mixtes.

1.4.4.2 Détermination des Équilibres en Stratégies Mixtes

Le principe qui se dégage de l'exemple précédent, c'est que si un joueur utilise une stratégie mixte qui laisse à l'autre joueur une meilleure réponse unique en stratégie pure, alors un équilibre en stratégies mixtes n'existe pas. La seule situation dans laquelle un équilibre en stratégies mixtes apparaît est celle où les stratégies mixtes choisies laissent

les deux joueurs indifférents entre les gains qu'ils peuvent s'attendre à recevoir de l'une ou l'autre de leurs stratégies pures. Par exemple, dans le jeu décrit précédemment, supposons que le général 2 utilise la stratégie mixte $q = \frac{4}{7}$ et $(1 - q) = \frac{3}{7}$. Alors le gain espéré du général 1 associé à l'une ou l'autre de ces stratégies pures est le même. Le gain espéré de battre en retraite est $\frac{4}{7} \times 5 + \frac{3}{7} \times 6 = \frac{38}{7}$. Le gain espéré d'attaquer est $\frac{4}{7} \times 8 + \frac{3}{7} \times 2 = \frac{38}{7}$.

Dans ce cas, le général 1 est indifférent entre ses deux stratégies pures. Il pourrait aussi bien choisir l'une ou l'autre de façon aléatoire, c'est à dire avec les probabilités $((p, 1 - p))$. Par exemple, le général 1 peut se retirer avec une probabilité de $p = \frac{3}{5}$ et attaquer avec une probabilité de $1 - p = \frac{2}{5}$. Et dans ce cas, le général 2 est aussi indifférent entre ses deux stratégies pures, chacune lui donnant un gain espéré de $\frac{24}{5}$. Une situation dans laquelle tous les joueurs choisissent leurs stratégies mixtes de façon à rendre leurs adversaires indifférents entre les gains espérés de chacune de leurs stratégies pures est appelé *équilibre en stratégies mixtes*.

1.5 Rationalité et Équité

La théorie néoclassique repose sur certaines hypothèses relatives au comportement humain - notamment que les individus sont rationnels et intéressés. Les théoriciens des jeux font aussi ces hypothèses. Ainsi lorsqu'ils considèrent un jeu, ils fondent leur analyse stratégique uniquement sur les gains que recevront les joueurs. Les théoriciens des jeux supposent qu'un joueur est intéressé par ses seuls gains et ne se soucie des gains de ses adversaires que dans la mesure où ces gains orientent les choix de ces derniers.

Cette vision traditionnelle du comportement humain a récemment été contestée par certains résultats expérimentaux. De nombreux économistes ont montré que les individus placés dans des situations de jeu étaient très soucieux d'équité dans l'issue du jeu. Évidemment, les résultats de telles études violent les hypothèses traditionnelles d'égoïsme et de rationalité. Une des expériences les plus célèbres a été réalisée en Allemagne par Guth, Schmittberger et Schwarze [38].

1.5.1 Rationalité Limitée

La rationalité implique que chaque joueur raisonne pour augmenter sa propre rentabilité. En d'autres termes, il possède toutes les informations qui lui permettent de rationaliser son choix, ce qui lui permet de maximiser son propre gain. L'idée de maximiser les gains attendus est justifiée dans [98]. Dans la réalité, l'hypothèse de la «rationalité parfaite» ne tient presque jamais et les acteurs ne sont pas censés pouvoir établir de manière

claire et immédiate leurs préférences [84]. On parle alors d'une «rationalité limitée» qui constitue l'un des principaux obstacles à l'application de la théorie des jeux conventionnels dans le monde réel.

La rationalité limitée des joueurs dans un jeu considère qu'ils disposent d'une quantité d'information et de capacités cognitives limitées ne leur permettant pas d'optimiser leurs choix. Cela signifie que : plutôt que de choisir l'action optimale, les joueurs choisissent une action qui leur donne un gain plus élevé avec une probabilité plus élevée. Le concept de rationalité limitée a attiré l'attention de nombreux chercheurs et a été étudié dans de nombreux travaux de recherche. Suren Basov a discuté des modèles de rationalité limitée et a présenté le problème de conception du choix des agents en se basant sur le modèle probabiliste de Luce [17]. Dans le livre [48], les auteurs ont montré que la prise de décision irrationnelle peut être expliquée si l'on prend en compte que les capacités humaines pour traiter l'information sont limitées. Ainsi, ils ont amélioré des techniques heuristiques pour prédire la qualité de la décision en formulant et en résolvant des problèmes d'optimisation. Différents modèles traitant la rationalité limitée sont expliqués en détail dans [79].

1.5.2 Équité et Bien-être Commun

Nous avons, jusqu'à présent, reposé sur les deux hypothèses simplificatrices majeures suivantes pour l'analyse de la théorie des jeux :

- Un joueur ne se soucie que de ses propres revenus ;
- Chaque joueur choisit la meilleure stratégie qui maximise ses propres gains.

Étant donné que ces hypothèses sont si essentielles aux conclusions que nous tirons, il est important que nous prenions le temps d'examiner quand elles se présentent et quand elles échouent. L'économiste Matthew Rabin a contesté ces deux hypothèses en intégrant la notion d'équité dans la théorie des jeux, et a conclu que la théorie des jeux classique ne permet pas de décrire avec précision le comportement humain en ce qui concerne les jeux traitant de gains inégaux entre les joueurs [76]. Pour arriver à cette conclusion, l'auteur a fait les trois importantes hypothèses suivantes :

- Les gens sont prêts à sacrifier leur propre bien-être matériel pour aider ceux qui sont gentils ;
- Les gens sont prêts à sacrifier leur propre bien-être matériel pour punir ceux qui sont méchants ;
- Ces deux motivations ont un effet important sur le comportement à mesure que le coût matériel du sacrifice devient plus petit.

Le chercheur procède ensuite à la définition d'un nouveau type d'équilibre, qu'il appelle

un «*équilibre d'équité*», qui reflète les implications de ces trois hypothèses.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les bases théoriques de la théorie des jeux en les illustrant par des exemples pédagogiques issus de la littérature. Nous avons commencé par la définition des jeux stratégiques et les différentes représentations des jeux : arbre ou forme extensive et forme normale/stratégique. Nous avons fait ensuite un bilan des différents types des jeux en fonction de leurs descriptions ou de leurs approches de résolution. Ainsi nous avons distingués les jeux coopératifs et non-coopératifs selon la possibilité de coopération et formation des coalitions entre les joueurs. Un jeu peut être simultané ou séquentiel, fini ou infini respectivement selon l'ordre de prise de décision dans le jeu et l'espace des stratégies de choix de chaque joueur. Un jeu peut être à somme nulle ou non nulle selon la structure des gains, comme il peut être joué une seule fois ou répété plusieurs fois. Les jeux peuvent être classés sur la base de l'information dont disposent les joueurs (jeux à information parfaite ou imparfaite, à information complète ou incomplète).

Le concept d'équilibre de Nash pour un jeu est défini comme étant une situation dans laquelle aucun des joueurs n'a d'incitation à modifier son comportement et changer sa stratégie unilatéralement. En cas de présence de plusieurs équilibres, nous avons expliqué comment éliminer les stratégies dominées et réduire le nombre d'équilibres. Dans le cas des jeux qui ne comportent pas d'équilibres en stratégies pures, nous avons fait appel aux stratégies mixtes (des stratégies pures probabilisées).

Finalement, nous avons discuté du concept de rationalité en abordant la rationalité limitée des joueurs et en soulignant que les joueurs sont moins égoïstes dans la réalité que ne le laissait supposer la théorie des jeux et qu'ils étaient très sensibles à la notion d'équité.

Impact de la Rationalité Limitée sur la Concurrence entre les Fournisseurs de Services

2.1 Introduction

La rationalité limitée est un concept proposé par Herbert Simon [85] qui a remis en question la rationalité humaine. La rationalité est limitée parce qu'il y a des limites à notre capacité de réflexion et à la disponibilité de l'information. Quand on parle d'une rationalité limitée et de la confusion systématique des clients, on se retrouve fortement dans un environnement concurrentiel entre les acteurs qui en font partie. Dans le cas des réseaux de télécommunication, les fournisseurs de services suivent ce type de stratégies de publication totalement ou partiellement confuses.

Actuellement, la théorie des jeux est largement utilisée pour analyser le comportement des clients et des fournisseurs de services dans les réseaux de télécommunications. La concurrence en termes de prix et de qualité de service entre les fournisseurs de services entraîne la formation de jeux non coopératifs.

Dans cette étude, nous considérons que le marché se compose de N fournisseurs de services et de clients rationnellement limités. Afin d'optimiser les revenus, chaque fournisseur de service rationnel décide des meilleures réponses de son prix p_i et de sa qualité de service q_i . Comme les fournisseurs de services partagent le même marché, le comportement de chacun dépend de celui de ses adversaires et de celui des clients. Dans ce chapitre, nous présentons un modèle pour démontrer un critère unique d'équilibre de Nash des prix et de la qualité de service pour plusieurs fournisseurs de services. Notre modèle est principalement inspiré du papier [14], où les auteurs ont examiné la rationalité des fournisseurs de services et ont construit un modèle de Markov formalisant le comportement des clients en fonction des actions stratégiques de fournisseurs de services pour étudier un jeu non coopératif pour la tarification et la qualité de service comme paramètres de décision. En revanche, dans notre cas, nous présenterons que la demande d'un fournisseur de service

est liée à la taille du marché (nombre d'utilisateurs) et à la probabilité de le choisir. Cette approche permet de rendre la demande comme une fonction non linéaire en prenant en compte le degré d'irrationalité des utilisateurs (λ).

La rationalité implique que chaque client doit raisonner pour augmenter ses propres gains. En d'autres termes, il possède toutes les informations sur le marché qui lui permettent de rationaliser son choix, afin de maximiser son propre gain. John V. Neumann et Morgenstren ont justifié l'idée de maximiser l'hypothèse d'utilité prévue dans leur travail [97]. Dans le monde réel, l'hypothèse de "rationalité totale" ne tient presque jamais. Cette "rationalité limitée" du monde réel est l'un des principaux obstacles à l'application de la théorie conventionnelle des jeux dans le monde réel.

La rationalité limitée des consommateurs signifie qu'au lieu de choisir l'action optimale, les clients choisissent une action qui leur donne un meilleur rendement avec une probabilité plus élevée. En particulier, nous adoptons le modèle de choix probabiliste de Luce, qui détermine la probabilité avec laquelle un client décidera de souscrire avec un SP_i donné. Nous considérons également que la rationalité limitée des consommateurs peut être mesurée par un degré d'irrationalité qui peut être exprimé par, λ , avec $\lambda = 0$ correspondant au comportement rationnel et $\lambda \rightarrow 1$ correspondant au choix totalement aléatoire.

Ce chapitre est organisé comme suit : Dans la section 3.2, nous citons les travaux connexes importants et remarquables dans la littérature. Dans la section 2.3, nous présentons la formulation du problème en modélisant le comportement du client à l'aide du modèle probabiliste de Luce et en décrivant le modèle d'utilité de SP s et le gain d'utilisateurs dans les réseaux de télécommunication. Ensuite, nous présentons l'analyse théorique du jeu non coopératif considéré dans cette étude et l'algorithme distribué utilisé pour apprendre le point de l'équilibre de Nash, respectivement dans les sections 2.4 et 4.4. Enfin, nous fournissons dans la section 4.5 une analyse numérique obtenue ; à base d'un simple scénario ; sur les modèles proposés dans ce travail pour valider ce qui a été obtenu dans l'analyse théorique et nous concluons ce chapitre dans la section 4.6.

2.2 Travaux Connexes

Dans des travaux connexes, le concept de rationalité limitée a attiré l'attention de nombreux chercheurs dans le domaine des réseaux de télécommunications. Dans le travail [79], les auteurs se sont concentrés d'étudier les différents modèles existants dans la littérature sur la rationalité limitée des clients. Dans le livre, [17], l'auteur a présenté les modèles de la rationalité limitée, il a également présenté le problème de conception du choix des agents,

régi par un modèle probabiliste, et fondé sa modélisation sur le modèle de Luce. De plus, nous avons exploré dans le livre [48] que les auteurs ont examiné le concept de rationalité limitée en montrant que la prise d'une décision irrationnelle peut être expliquée si l'on prend en compte le fait que les capacités humaines de traitement de l'information sont limitées. Ainsi, ils ont utilisé et amélioré les techniques heuristiques pour prédire la qualité de la décision en formulant et en résolvant des problèmes d'optimisation proposés. Dans le papier [40], les auteurs ont été en mesure de présenter quelques résultats intéressants sur la confusion des clients (confondre les consommateurs pour les rendre irrationnels) en considérant le paramètre du prix réel des services offerts par les fournisseurs de services. Ainsi, l'impact de la confusion sur la dynamique des réseaux de télécommunication est discuté. Nous trouvons dans le travail [25, 60] que les auteurs ont proposé des modèles de tarification supplémentaires dans lesquels les consommateurs disposent d'informations sur les prix imparfaites et doivent payer d'autres frais pour rechercher des informations complètes qui les rendent rationnelles. Ils ont conclu que tant que l'incertitude est forte, la décision d'acquérir des informations devient un complément stratégique.

La rationalité limitée des joueurs a été étudiée dans de nombreuses recherches. Les auteurs des articles [2, 31, 20, 99] ont proposé que des informations partielles puissent être modélisées comme profils marginaux. Les joueurs décident de leur stratégie en fonction de leur profit marginal respectif. Dans l'article [14] les auteurs ont modélisé le comportement des clients envers les réseaux de télécommunication et la rationalité limitée des fournisseurs de services. La migration ou le comportement dynamique des clients dans le domaine des réseaux de télécommunication est formalisé sous la forme d'une chaîne de Markov. Dans ce système dynamique, les auteurs ont démontré théoriquement et numériquement la stabilité de l'équilibre entre les prestataires de services. Mais le concept de rationalité limitée sur les clients est peu étudié, surtout dans les réseaux de télécommunications. Les auteurs de l'article [18] ont considéré un modèle oligopolistique de Bertrand en modélisant la rationalité des consommateurs qui prennent leurs décisions d'achat de manière probabiliste selon le modèle Luce qui est un modèle d'affaires s'adressant aux entreprises de toutes sortes; c'est plus général. Dans l'article [22], les auteurs proposent un modèle de prix de vente en tenant compte de la façon dont l'entreprise présente ses prix aux consommateurs et c'est cette façon qui les rend irrationnels. Les auteurs de l'article [66] ont pu introduire le concept de la confusion des clients dans les réseaux de télécommunication et ont proposé un modèle de prix concurrentiel entre deux fournisseurs de services rationnels. Le modèle proposé dans ce travail est basé sur le paramètre prix sans utiliser l'autre pôle des stratégies de fournisseurs de services qui est la qualité de service. Les auteurs ont examiné l'incidence de la confusion chez les clients sur un marché de deux fournisseurs

de services. Dans notre travail, nous étendrons l'étude en proposant un nouveau modèle compétitif entre plusieurs fournisseurs de services qui prennent leurs stratégies de décision en fonction du prix et de la qualité de service. Notre modèle sera basé sur une nouvelle formulation de la demande non linéaire et nous adapterons le modèle probabiliste de Luce utilisé dans l'article [18] pour le cas des réseaux de télécommunications.

2.3 Formulation du problème

2.3.1 Modélisation de Comportement des Clients

La modélisation du comportement du client est une tâche très importante lorsqu'on étudie économiquement un marché. Dans les réseaux de télécommunications, les auteurs P. Maille, M. Naldi et B. Tuffin [56] ont modélisé ce comportement sous forme de chaîne de Markov. Dans cette étude, nous utilisons le modèle de Luce pour modéliser le choix discret des clients en exploitant la fonction softmax qui s'appelle aussi la fonction exponentielle normalisée [24], comme dans l'article [74].

2.3.1.1 Modèle de Luce

Le modèle de Luce est un premier modèle probabiliste de choix qui incorpore un choix rationnel limité des clients [43, 75]. En utilisant ce modèle, les clients peuvent choisir le fournisseur de services qui maximise leurs gains avec des probabilités plus élevées, mais pas nécessairement la meilleure réponse avec probabilité. Plus précisément, les probabilités de choix de stratégies spécifiques sont proportionnelles aux gains attendus associés à ces stratégies. Nous étendons ce framework en incluant un paramètre λ qui symbolise degré d'irrationalité des clients.

Lorsque les clients sont confrontés à un choix entre différentes alternatives $i \in \{1..N\}$, le décideur parfaitement rationnel choisit toujours la ou les options préférées $i \in \{\arg \max_i(u_i)\}$, où u_i est le bénéfice des utilisateurs qui ont choisi SP i . En revanche, pour saisir la rationalité limitée, nous supposons que les clients choisissent l'alternative $i \in \{1..N\}$ avec probabilité, comme dans [89] qui est donnée par :

$$\rho_i = \frac{\exp(u_i/\lambda)}{\sum_{j=1}^N \exp(u_j/\lambda)} \quad (2.1)$$

où, $\lambda \in [0, 1]$, est un degré d'irrationalité des clients aux réseaux de télécommunications. Au fur et à mesure que λ augmente (environ 1), le client est moins susceptible de choisir l'offre (le SP) ayant les attentes les plus élevées et il n'explorera pas d'autres offres

provenant d'autres *SPs*. Donc dans ce cas, le choix est aléatoire et on dit que le choix du client est irrationnel. Mais, si λ diminue (approche 0), le client est susceptible de faire un choix rationnel.

2.3.1.2 Utilité et Modélisation du Comportement

Nous considérons que l'utilitaire u_i des clients qui sont abonnés avec SP_i est une fonction qui dépend des stratégies prix p_i et QoS q_i du fournisseur de services i :

$$u_i(p_i, q_i) = v_i(q_i) - p_i \quad (2.2)$$

où $v_i(q_i)$ sont les revenus des clients qui sont abonnés auprès du fournisseur de services i .

Nous supposons que les clients ne décident jamais de s'abonner auprès de plus d'un fournisseur de services, c'est-à-dire que chaque consommateur a des choix différents en $(N + 1)$, donc la probabilité que les clients décident de s'abonner auprès du fournisseur de services i est de :

$$\rho_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \frac{\exp\left(\frac{v_i(q_i) - p_i}{\lambda}\right)}{1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{v_j(q_j) - p_j}{\lambda}\right)} \quad (2.3)$$

2.3.2 Modèle d'utilité

Nous considérons une population de n clients, donc la demande attendue du fournisseur de services i est donnée par, $n\rho_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})$. Ainsi, la fonction d'utilité du fournisseur de services i , est exactement la différence entre ses revenus, $n\rho_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})p_i$, et les frais payés pour acheter une quantité donnée de bande passante μ_i :

$$\begin{aligned} \Pi_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}) &= n\rho_i p_i - F_i(\rho_i, q_i) \\ &= n\rho_i p_i - \vartheta_i \mu_i(n, \rho_i, q_i) \end{aligned} \quad (2.4)$$

où ϑ_i est le prix de l'unité de bande passante et $\mu_i(\rho_i, q_i)$ est la quantité de bande passante requise par le fournisseur de services i pour garantir la QoS q_i promise, qui a la forme suivante :

$$\mu_i(n, \rho_i, q_i) = (n\rho_i)g_i(q_i) + h_i(q_i) \quad (2.5)$$

où n est un nombre de clients sur le marché et $g_i(q_i)$ et $h_i(q_i)$ sont des fonctions positives en augmentation.

La fonction de profil du fournisseur de services i devient :

$$\Pi_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \frac{n \exp\left(\frac{v_i(q_i) - p_i}{\lambda}\right)}{1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{v_j(q_j) - p_j}{\lambda}\right)} (p_i - \vartheta_i g_i(q_i)) - \vartheta_i h_i(q_i). \quad (2.6)$$

2.3.3 Le profit des utilisateurs dans les télécommunication Networks

Le gain réel des utilisateurs dans les réseaux de télécommunication dépend normalement non seulement de son abonnement aux services du fournisseur i , mais aussi des stratégies des autres fournisseurs de services SP_{-i} (concurrents du fournisseur i). Nous proposons dans cette section la modélisation de ce bénéfice en ajoutant la contrainte sur la qualité de service au premier modèle proposé dans l'article [7].

Le revenu de l'utilisateur u s'il choisit l'abonnement chez le fournisseur de services i est :

$$R_i^u(p^*, q^*) = u_i(p_i, q_i) - \sum_{j=1, j \neq i}^N \beta_j^u [(p_i^* - p_j^*) + (q_i^* - q_j^*)] \quad (2.7)$$

Où :

- $\beta_j^u \in [0, 1] \forall j \in [1, N]$ and $j \neq i$ est la sensibilité de l'utilisateur u aux stratégies motivantes des adversaires de son fournisseur de services i . Si $\beta_j^u \rightarrow 0$ alors l'utilisateur u est fidèle à son fournisseur de services i , mais si $\beta_j^u \rightarrow 1$ alors l'utilisateur u est totalement attiré par l'offre du fournisseur de services j et dans ce cas l'utilisateur u est au point de changer le fournisseur de services (migration des clients).
- p^* est le vecteur de prix à l'équilibre de Nash.
- q^* est le vecteur de la qualité de services à l'équilibre de Nash.

Donc, le profit (bien-être) de l'utilisateur u dans les réseaux de télécommunication est l'accumulation de ses revenus, il est présenté dans cette équation :

$$G_u(p^*, q^*) = \sum_{i=1}^N R_i^u(p^*, q^*) \quad (2.8)$$

2.4 Analyse du Jeu non-Coopératif

Dans les réseaux de télécommunications, les fournisseurs de services peuvent être en concurrence sur plusieurs variables. Ils peuvent, par exemple, être compétitifs en fonction

de leurs choix de prix et de qualité de service. Cependant, nous considérons un système avec N fournisseurs de services rationnels qui décident leurs stratégies de prix et de qualité de service afin de maximiser leur utilité/bénéfice individuel $\Pi_i(\cdot)$. Ces fournisseurs de services sont égoïstes et ne coopèrent pas entre eux pour gérer leurs politiques. Mais, ils ont toutes les informations récentes sur toutes les stratégies de leurs adversaires. Ensuite, le jeu étudié dans ce travail est un jeu non coopératif et à information complète.

Le jeu non-coopératif entre les fournisseurs de services rationnels est formulé comme suit :

Notons $G = [\mathcal{N}, \{P_i, Q_i\}, \{\Pi_i(\cdot)\}]$ désigne le jeu non-coopératif de prix et de qualités de service, où $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ est l'index identifiant les fournisseurs de services, P_i est l'ensemble de stratégies de prix du fournisseur de services i , Q_i est l'ensemble de stratégies de qualités de service du fournisseur de services i , et $\Pi_i(\cdot)$ est la fonction d'utilité du fournisseur de services i qui est définie à l'équation 2.6. Nous supposons que les espaces stratégiques P_i et Q_i de chaque fournisseur de services i sont des ensembles compacts et convexes avec des contraintes maximales et minimales, pour un fournisseur de services donné i nous considérons les espaces des stratégies comme des intervalles fermés $P_i = [p_i, \bar{p}_i]$ et $Q_i = [q_i, \bar{q}_i]$. Le vecteur de prix est noté $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_N)^T \in P^N = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_N$ et le vecteur QoS comme $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_N)^T \in Q_N = Q_1 \times Q_2 \times \dots \times Q_N$.

Afin de maximiser leurs utilités, chaque fournisseur de services i fixe un prix p_i et une QoS q_i . Formellement, le problème peut s'exprimer comme suit :

$$\max_{p_i \in P_i, q_i \in Q_i} \Pi_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}), \quad \forall i \in \mathcal{N}.$$

2.4.1 Jeu à QoS Fixe

Dans la présente section, nous considérons le modèle du Bertrand qui examine l'interdépendance entre les décisions des rivaux en matière de prix. Dans cette section, nous présentons l'utilité de tous les fournisseurs de services qui offrent des services homogènes aux clients, ainsi que le gain des clients dans les réseaux de télécommunication.

Dans cette partie, nous considérons que les fournisseurs de services ont fixé leur QoS, \mathbf{q} , à un point prédéterminé, $\bar{\mathbf{q}}$, et nous considérons uniquement le jeu des prix. La fonction d'utilité (2.6) devient :

$$\Pi_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}) = \frac{n \exp\left(\frac{\bar{v}_i - p_i}{\lambda}\right)}{1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\bar{v}_j - p_j}{\lambda}\right)} (p_i - \vartheta_i \bar{g}_i) - \vartheta_i \bar{h}_i. \quad (2.9)$$

avec $v(\bar{q}_i) = \bar{v}_i$, $\bar{g}_i = g_i(\bar{q}_i)$ et $\bar{h}_i = h_i(\bar{q}_i)$ sont des constantes réelles positives.

Une propriété importante de la dérivée de la relation (2.3) est la suivante :

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial p_i} = -\frac{\rho_i(1 - \rho_i)}{\lambda},$$

Preuve. 1

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_i}{\partial p_i} &= \frac{\partial \left(\frac{\exp\left(\frac{\bar{v}_i - p_i}{\lambda}\right)}{1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\bar{v}_j - p_j}{\lambda}\right)} \right)}{\partial p_i} \\ &= \frac{\frac{\partial \exp\left(\frac{\bar{v}_i - p_i}{\lambda}\right)}{\partial p_i} \left(1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\bar{v}_j - p_j}{\lambda}\right)\right) - \frac{\partial \left(1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\bar{v}_j - p_j}{\lambda}\right)\right)}{\partial p_i} \exp\left(\frac{\bar{v}_i - p_i}{\lambda}\right)}{\left(1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\bar{v}_j - p_j}{\lambda}\right)\right)^2} \\ &= \frac{-\frac{\exp\left(\frac{\bar{v}_i - p_i}{\lambda}\right)}{\lambda} \left(1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\bar{v}_j - p_j}{\lambda}\right)\right) + \frac{\left(\exp\left(\frac{\bar{v}_i - p_i}{\lambda}\right)\right)^2}{\lambda}}{\left(1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\bar{v}_j - p_j}{\lambda}\right)\right)^2} \\ &= -\frac{\exp\left(\frac{\bar{v}_i - p_i}{\lambda}\right)}{\lambda \left(1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\bar{v}_j - p_j}{\lambda}\right)\right)} + \frac{\left(\exp\left(\frac{\bar{v}_i - p_i}{\lambda}\right)\right)^2}{\lambda \left(1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\bar{v}_j - p_j}{\lambda}\right)\right)^2} \\ &= -\frac{\rho_i}{\lambda} + \frac{\rho_i^2}{\lambda} = -\frac{\rho_i(1 - \rho_i)}{\lambda} \end{aligned}$$

par conséquent, la dérivée de profit pour le fournisseur de services i est :

$$\frac{\partial \Pi_i(p_i, \mathbf{p}_{-i})}{\partial p_i} = -n(p_i - \vartheta_i \bar{g}_i) \frac{\rho_i(1 - \rho_i)}{\lambda} + n\rho_i, \quad \forall i = 1..N \quad (2.10)$$

avec la dérivée seconde

$$\frac{\partial^2 \Pi_i(p_i, \mathbf{p}_{-i})}{\partial p_i^2} = -n(p_i - \vartheta_i \bar{g}_i) \frac{\rho_i(1 - \rho_i)(2\rho_i - 1)}{\lambda^2} - 2n \frac{\rho_i(1 - \rho_i)}{\lambda} \quad (2.11)$$

Définition 2.1 Le vecteur prix $\mathbf{p}^* = (p_1^*, \dots, p_N^*)$ est l'équilibre de Nash pour le jeu des prix $G = [\mathcal{N}, \{P_i, Q_i\}, \{\Pi_i(\cdot)\}]$ si :

$$\forall (i, p_i) \in (\mathcal{N}, \mathbf{P}_i), \Pi_i(p_i^*, \mathbf{p}_{-i}^*) \geq \Pi_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}^*)$$

with $\mathbf{p}_{-i}^* = (p_1^*, \dots, p_{i-1}^*, p_{i+1}^*, \dots, p_N^*)$

Théorème 2.1 Le jeu $G = [\mathcal{N}, \{P_i, \bar{Q}_i\}, \{\Pi_i(\cdot)\}]$ admet au moins un équilibre de Nash de prix (L'existence de l'équilibre) si et seulement si $p_i > \vartheta_i \bar{g}_i - \frac{2\lambda}{2\rho_i - 1}$.

Preuve. 2 Pour prouver l'existence, nous notons que pour chaque fournisseur de services, l'espace de stratégies P_i est défini par tous les prix dans l'intervalle fermé délimité par les prix minimum et maximum. Ainsi, l'espace de stratégies commune P est un sous-ensemble non vide, convexe et compact dans l'espace euclidien R^N . De plus, les fonctions d'utilité sont concaves par rapport aux prix, comme on peut le voir dans le test de la dérivée seconde.

L'équation 2.11 représentent la dérivée seconde de la fonction d'utilité 2.9 relative aux prix. La condition pour que cette fonction soit strictement concave est la suivante :

$$\frac{\partial^2 \Pi_i(p_i, \mathbf{p}_{-i})}{\partial p_i^2} < 0,$$

$$\text{donc} \quad -n(p_i - \vartheta_i \bar{g}_i) \frac{\rho_i(1 - \rho_i)(2\rho_i - 1)}{\lambda^2} - 2n \frac{\rho_i(1 - \rho_i)}{\lambda} < 0,$$

$$\text{Finalement} \quad p_i > \vartheta_i \bar{g}_i - \frac{2\lambda}{2\rho_i - 1},$$

Ce qui assure l'existence de l'équilibre de Nash.

Théorème 2.2 Le jeu de prix $G = [\mathcal{N}, \{P_i, \bar{Q}_i\}, \{\Pi_i(\cdot)\}]$ admet un équilibre de Nash unique si et seulement si $p_i > \vartheta_i \bar{g}_i - \frac{3\lambda}{2(2\rho_i - 1)}$.

Preuve. 3 Pour démontrer l'unicité de l'équilibre de Nash, nous utilisons la méthode la plus courante qui est la vérification de la satisfaction de la condition proposée par Rosen [80] et Moulin [67], (voir, par exemple, [61]) et qui se résume à la proposition suivante pour un jeu concave [47] : Si un jeu concave satisfait la condition de solvabilité dominante suivante :

$$-\frac{\partial^2 U_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}_s)}{\partial p_i^2} - \sum_{j \neq i} \left| \frac{\partial^2 U_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}_s)}{\partial p_i \partial p_j} \right| \geq 0 \quad (2.12)$$

alors le jeu G admet un équilibre de Nash unique.

Nous avons

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial p_i \partial p_j} = \left(\frac{n(p_i - \vartheta_i \bar{g}_i)}{\lambda^2} (2\rho_i^2 - \rho_i) + \frac{n}{\lambda} \rho_i \right) \rho_j,$$

donc :

$$\begin{aligned} \sum_{j \neq i} \left| \frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial p_i \partial p_j} \right| &= \left| \frac{n(p_i - \vartheta_i \bar{g}_i)}{\lambda^2} (2\rho_i^2 - \rho_i) + \frac{n}{\lambda} \rho_i \right| \sum_{j \neq i} \rho_j \\ &= \left| \frac{n(p_i - \vartheta_i \bar{g}_i)}{\lambda^2} (2\rho_i - 1) + \frac{n}{\lambda} \rho_i (1 - \rho_i) \right|, \end{aligned} \quad (2.13)$$

A partir de (2.11) et (2.13) nous avons :

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial p_i^2} + \sum_{j \neq i} \left| \frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial p_i \partial p_j} \right| = \rho_i (1 - \rho_i) \left(-\frac{n(p_i - \vartheta_i \bar{g}_i)(2\rho_i - 1)}{\lambda^2} - \frac{2n}{\lambda} + \left| \frac{n(p_i - \vartheta_i \bar{g}_i)}{\lambda^2} (2\rho_i - 1) + \frac{n}{\lambda} \rho_i \right| \right),$$

si $\left(\frac{n(p_i - \vartheta_i \bar{g}_i)}{\lambda^2} (2\rho_i - 1) + \frac{n}{\lambda} \geq 0 \right)$, i.e. $p_i \geq \vartheta_i \bar{g}_i - \frac{\lambda}{2\rho_i - 1}$ alors

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial p_i^2} + \sum_{j \neq i} \left| \frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial p_i \partial p_j} \right| = -\frac{n\rho_i(1 - \rho_i)}{\lambda} < 0,$$

si $\left(\frac{n(p_i - \vartheta_i \bar{g}_i)}{\lambda^2} (2\rho_i - 1) + \frac{n}{\lambda} \leq 0 \right)$, i.e. $p_i \leq \vartheta_i \bar{g}_i - \frac{\lambda}{2\rho_i - 1}$ alors

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial p_i^2} + \sum_{j \neq i} \left| \frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial p_i \partial p_j} \right| = \frac{-n\rho_i(1 - \rho_i)}{\lambda} \left(\frac{2(p_i - \vartheta_i \bar{g}_i)}{\lambda} (2\rho_i - 1) + 3 \right)$$

Nous concluons alors que si la condition $p_i > \vartheta_i \bar{g}_i - \frac{3\lambda}{2(2\rho_i - 1)}$ est remplie, le jeu G admet un équilibre de Nash unique.

2.4.2 Jeu à Prix Fixe

Nous considérons dans cette section que pour tous les fournisseurs de services le paramètre du prix est fixé, le jeu de la QoS survient lorsque le fournisseur de services i décide sur le paramètre de la QoS afin de maximiser son profit. Nous supposons que la mesure définissant la QoS q_i correspond à une fonction du retard prévu. Nous utiliserons

la fonction de retard proposée par Kleinrock [44]¹ qui est une fonction commune utilisée dans la modélisation des jeux dans les réseaux [68]. Alors :

$$q_i = \frac{1}{\sqrt{\text{Delay}_i}} = \sqrt{\mu_i - n\rho_i}, \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (2.14)$$

Ce qui veut dire que :

$$\mu_i(n, \rho_i, q_i) = q_i^2 + n\rho_i \quad (2.15)$$

A partir de ce dernier et selon l'équation (2.5), nous avons :

$$\begin{cases} g_i(q_i) = 1 \\ h_i(q_i) = q_i^2 \end{cases}$$

Donc, l'équation (2.6) devient :

$$\Pi_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \frac{n \exp\left(\frac{\alpha q_i - p_i}{\lambda}\right)}{1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\alpha q_j - p_j}{\lambda}\right)} (p_i - \vartheta_i) - \vartheta_i q_i^2. \quad (2.16)$$

Une propriété importante de la dérivée de la relation (2.3) par rapport à q_i est :

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial q_i} = \frac{\alpha}{\lambda} \rho_i (1 - \rho_i),$$

Preuve. 4

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_i}{\partial q_i} &= \frac{\partial \left(\frac{\exp\left(\frac{\alpha q_i - p_i}{\lambda}\right)}{1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\alpha q_j - p_j}{\lambda}\right)} \right)}{\partial q_i} \\ &= \frac{\frac{\partial \exp\left(\frac{\alpha q_i - p_i}{\lambda}\right)}{\partial q_i} \left(1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\alpha q_j - p_j}{\lambda}\right)\right) - \frac{\partial \left(1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\alpha q_j - p_j}{\lambda}\right)\right)}{\partial q_i} \exp\left(\frac{\alpha q_i - p_i}{\lambda}\right)}{\left(1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\alpha q_j - p_j}{\lambda}\right)\right)^2} \end{aligned}$$

1. Cette fonction correspond à un retard dans la file d'attente de type file M/M/1 avec la règle du premier entré, premier sorti ou à la file M/G/1 qui est plus générale avec un retard au niveau du partage de processeur.

$$\begin{aligned}
&= \frac{\frac{\alpha \cdot \exp\left(\frac{\alpha q_i - p_i}{\lambda}\right)}{\lambda} \left(1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\alpha q_j - p_j}{\lambda}\right)\right) - \frac{\alpha \cdot (\exp\left(\frac{\alpha q_i - p_i}{\lambda}\right))^2}{\lambda}}{\left(1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\alpha q_j - p_j}{\lambda}\right)\right)^2} \\
&= \frac{\alpha \cdot \exp\left(\frac{\alpha q_i - p_i}{\lambda}\right)}{\lambda \left(1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\alpha q_j - p_j}{\lambda}\right)\right)} + \frac{\alpha (\exp\left(\frac{\alpha q_i - p_i}{\lambda}\right))^2}{\lambda \left(1 + \sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{\alpha q_j - p_j}{\lambda}\right)\right)^2} \\
&= \frac{\alpha}{\lambda} \rho_i - \frac{\alpha}{\lambda} \rho_i^2 = \frac{\alpha}{\lambda} \rho_i (1 - \rho_i)
\end{aligned}$$

Par conséquent, la dérivé première de l'utilité du fournisseur de services i est :

$$\frac{\partial \Pi_i(q_i, \mathbf{q}_{-i})}{\partial q_i} = \frac{n \cdot \alpha}{\lambda} (p_i - \vartheta_i) \rho_i (1 - \rho_i) - 2\vartheta_i q_i, \quad \forall i = 1..N \quad (2.17)$$

et la dérivée seconde est comme suit :

$$\frac{\partial^2 \Pi_i(q_i, \mathbf{q}_{-i})}{\partial q_i^2} = n \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 (p_i - \vartheta_i) \rho_i (1 - \rho_i) (1 - 2\rho_i) - 2\vartheta_i, \quad (2.18)$$

Définition 2.2 Le vecteur $QoS \mathbf{q}^* = (q_1^*, \dots, q_N^*)$ est un équilibre de Nash pour le jeu QoS $G = [\mathcal{N}, \{P_i, Q_i\}, \{\Pi_i(\cdot)\}]$ si :

$$\forall (i, q_i) \in (\mathcal{N}, \mathbf{Q}_i), \Pi_i(q_i^*, \mathbf{q}_{-i}^*) \geq \Pi_i(q_i, \mathbf{q}_{-i}^*)$$

avec $\mathbf{q}_{-i}^* = (q_1^*, \dots, q_{i-1}^*, q_{i+1}^*, \dots, q_N^*)$

Théorème 2.3 Le jeu $QoS G = [\mathcal{N}, \{\bar{P}_i, Q_i\}, \{\Pi_i(\cdot)\}]$ admet au moins un équilibre de Nash si et seulement si $\vartheta_i > \frac{n}{2} \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 \rho_i (1 - \rho_i) (1 - 2\rho_i)$.

Preuve. 5 L'équation 2.18 représente la dérivée seconde de la fonction d'utilité 2.16 relative au paramètre de la QoS . La condition pour que cette fonction soit concave est la suivante :

$$\frac{\partial^2 \Pi_i(q_i, \mathbf{q}_{-i})}{\partial q_i^2} < 0,$$

$$\text{donc } n \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 (p_i - \vartheta_i) \rho_i (1 - \rho_i) (1 - 2\rho_i) - 2\vartheta_i < 0,$$

$$\text{Finalement } \vartheta_i > \frac{n}{2} \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 \rho_i (1 - \rho_i) (1 - 2\rho_i),$$

Théorème 2.4 *Le jeu à prix fixe $G = [\mathcal{N}, \{\bar{P}_i, Q_i\}, \{\Pi_i(\cdot)\}]$ admet un équilibre de Nash unique si et seulement si $\vartheta_i > \frac{N+2}{2}(1 - 2\rho_i)$.*

Preuve. 6 *Pour démontrer l'unicité de l'équilibre de Nash, nous utilisons la méthode la plus courante qui est la vérification de la satisfaction de la condition proposée par Rosen [80] et Moulin [67], (voir, par exemple, [61]) et qui se résume à la proposition suivante pour un jeu concave [47] : Si un jeu concave satisfait la condition de solvabilité dominante suivante :*

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial q_i^2} + \sum_{j \neq i} \left| \frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial q_i \partial q_j} \right| < 0. \quad (2.19)$$

Nous avons

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial q_i \partial q_j} = -n \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 (p_i - \vartheta_i) \rho_i (1 - \rho_i) (1 - 2\rho_i),$$

donc :

$$\begin{aligned} \sum_{j \neq i} \left| \frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial q_i \partial q_j} \right| &= \sum_{j \neq i} \left| n \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 (p_i - \vartheta_i) \rho_i (1 - \rho_i) (1 - 2\rho_i) \right| \\ &= n(N-1) \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 (p_i - \vartheta_i) \rho_i (1 - \rho_i) |1 - 2\rho_i|, \end{aligned} \quad (2.20)$$

A partir de (2.18) et (2.20) nous avons :

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial q_i^2} + \sum_{j \neq i} \left| \frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial q_i \partial q_j} \right| = n \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 (p_i - \vartheta_i) \rho_i (1 - \rho_i) [1 - 2\rho_i - 2\vartheta_i + (N-1)|1 - 2\rho_i|],$$

Si $\rho_i < \frac{1}{2}$, la condition pour que l'expression de l'équation (2.19) soit satisfaite est : $\vartheta_i > \frac{N}{2}(1 - 2\rho_i)$

Mais si $\rho_i > \frac{1}{2}$, la condition pour que l'expression de l'équation (2.19) soit satisfaite est : $\vartheta_i > \frac{N+2}{2}(1 - 2\rho_i)$

A partir de ces deux conditions, nous pouvons conclure que quelle que soit la valeur du $\rho_i \in \{0, 1\}$ si $\vartheta_i > \frac{N+2}{2}(1 - 2\rho_i)$ alors que l'équilibre du jeu à prix fixe est unique.

2.4.3 Jeu Conjoint du Prix et de la QoS

Comme indiqué précédemment, la fonction de profit de chaque fournisseur de services est strictement concave en ce qui concerne ses propres QoS et prix. Par conséquent, la meilleure réponse du prix et de la qualité de service des fournisseurs de services sont

définies de manière unique. Ainsi, les conditions de qualité de service et de prix qui maximisent l'utilité donnée dans l'équation 2.16 sont respectivement :

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})}{\partial p_i} = 0, \\ \frac{\partial \Pi_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})}{\partial q_i} = 0, \end{cases}$$

Ainsi, le calcul de l'équilibre de Nash peut être effectué en résolvant ce dernier système. Les solutions d'équations induisent en supprimant les dérivées partielles correspondant à la meilleure réponse pour le jeu conjoint du prix et de la QoS. Comme ce système est non linéaire, il est difficile d'obtenir des formules analytiques pour sa solution. Pour cette raison, nous utilisons l'algorithme 1 présenté dans la section suivante pour montrer la convergence vers le point d'équilibre de Nash pour ce jeu conjoint.

2.5 Apprentissage de l'équilibre de Nash

2.5.1 Algorithme de la Meilleure Réponse

Ci-dessous, nous analysons la concurrence de prix ou de la qualité de service pour N fournisseurs de services qui cherchent à maximiser leurs utilités. Pour ce faire, nous déterminons le point de l'équilibre pour chaque jeu après avoir démontré l'existence et l'unicité de l'équilibre du jeu entre les fournisseurs de services. L'algorithme 1 consiste à calculer la meilleure réponse dynamique pour chaque joueur, qui est définie comme sa stratégie optimale qui lui permet d'avoir un gain optimal (optimisation de l'utilité) en tenant compte des stratégies des adversaires. La meilleure réponse dynamique d'un joueur, comme son nom l'indique, consiste à adapter sa stratégie aux stratégies récentes des autres et sans prendre en compte l'effet des stratégies actuelles de tous les joueurs sur le jeu à venir.

Algorithm 1 Algorithme de la Meilleure Réponse

- 1: Initialisation des vecteurs de stratégies(prix/QoS) ;
 - 2: Pour chaque fournisseur de services $i \in \mathcal{N}$ à l'itération t :
 - $p_i^{t+1} = \operatorname{argmax}_{p_i \in \mathbf{P}} (\Pi_i(\mathbf{p}^t, \mathbf{q}^t))$;
 - $q_i^{t+1} = \operatorname{argmax}_{q_i \in \mathbf{Q}} (\Pi_i(\mathbf{p}^t, \mathbf{q}^t))$.
-

2.5.2 Prix de l'Anarchie

Le concept de surplus social [58] ou de coût total [96] est défini comme le maximum de la somme des utilités de tous les agents des systèmes (c'est-à-dire des fournisseurs). Il est bien connu dans la théorie des jeux que l'égoïsme de l'agent, comme dans un équilibre de Nash, ne conduit généralement pas à une situation socialement efficace. Comme mesure de la perte d'efficacité due à la divergence des intérêts des utilisateurs, nous utilisons le prix de l'anarchie (*PoA*) [46], ce dernier concept mesure la perte d'efficacité due à l'égoïsme des acteurs. Il mesure donc à quel point un système où tous les agents agissent pour optimiser leurs intérêts qui peuvent être éloigné d'une situation optimale du point de vue global.

Cette mesure a été définie dans [46] comme le rapport le plus défavorable comparant la mesure d'efficacité globale choisie à l'issue du jeu non coopératif joué par les acteurs, à la valeur optimale de cette mesure d'efficacité. Un *PoA* proche de 1 indique que l'équilibre est à peu près optimal sur le plan social et que les conséquences d'un comportement égoïste sont donc relativement affables. Le terme prix de l'anarchie a été utilisé par Koutsoupias et Papadimitriou [46] comme dans [37], mais l'idée de mesurer l'inefficacité de l'équilibre est plus ancienne. La perte d'efficacité due à l'égoïsme des acteurs est mesurée comme étant le quotient du bien-être social obtenu à l'équilibre de Nash et la valeur maximale du bien-être social (comme dans [81]) :

$$PoA = \frac{\min_{p, \bar{q}} W_{NE}(p, \bar{q})}{\max_{p, \bar{q}} W(p, \bar{q})} \quad (2.21)$$

Avec $W(p, \bar{q}) = \sum_{i=1}^N \Pi_i(p, \bar{q})$ est une fonction du bien-être et $W_{NE}(p, \bar{q}) = \sum_{i=1}^N \Pi_i(p^*, \bar{q})$ est une somme des utilités de tous les acteurs de l'équilibre de Nash.

2.6 Analyse Numérique

Pour clarifier et montrer comment tirer profit de notre étude théorique, nous proposons dans cette section d'étudier numériquement le jeu entre les fournisseurs de services dans les réseaux de télécommunication tout en considérant l'algorithme de meilleure réponse dynamique (Alg. 1) décrit dans la section précédente et les expressions de la demande ainsi que les fonctions d'utilité modélisée dans cet étude. Nous considérons donc un système avec deux fournisseurs de services homogènes cherchant à maximiser leurs revenus respectifs. Jusqu'à ce que nous contre-indiquions, les valeurs des paramètres du système

sont résumées dans la table 2.1.

n	N	\bar{v}_1	\bar{v}_2	λ	$P_1 = P_2$
100	2	25	20	0.7	[1 : 1000]
\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{h}_1	\bar{h}_2	ϑ_1	ϑ_2
5	10	4	6	1.5	1

TABLE 2.1 – Paramétrage utilisé pour les résultats numériques

La figure 2.1 représente les courbes de convergence vers le point d'équilibre pour le jeu des prix entre les fournisseurs de services. L'algorithme de la meilleure réponse dynamique utilisé dans ce cadre montre la convergence vers un équilibre de Nash unique. Nous remarquons également que l'algorithme a tourné d'environ 10 itérations, ce qui montre la rapidité de la vitesse de convergence. Ainsi, cette simulation de l'algorithme 1 est capable de converger efficacement vers l'équilibre de Nash pour le jeu de prix.

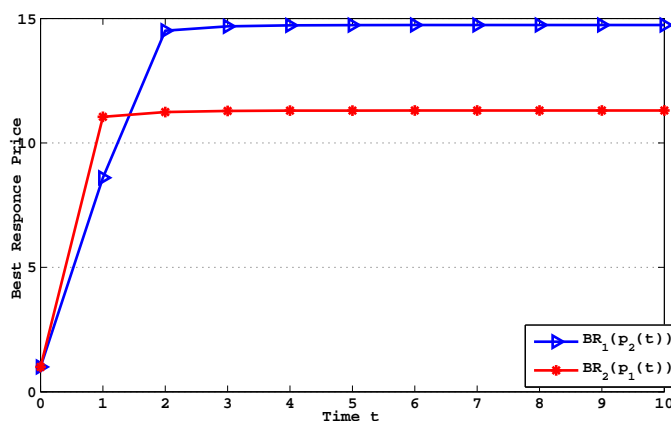


FIGURE 2.1 – Convergence vers le point d'équilibre pour le jeu de prix

Figure 2.2 représentent les courbes de convergence l'équilibre de Nash du jeu à prix fixe pour les deux fournisseurs de services. L'algorithme de la meilleure réponse dynamique utilisé converge vers un équilibre de Nash unique. Nous remarquons également que l'algorithme a tourné d'environ 12 itérations, ce qui montre la rapidité de la vitesse de convergence. Ainsi, cette simulation de l'algorithme 1 est capable de converger efficacement vers d'équilibre de Nash pour le jeu de la QoS.

Les courbes tracées dans les figures 2.3 et 2.4 montrent la convergence vers l'équilibre de Nash pour le jeu conjoint de prix et de la QoS et montrent le caractère unique de ce point d'équilibre, qui est difficile à trouver analytiquement en raison de la non linéarité du système d'équations donné ci-dessus. L'algorithme 1 présenté dans la section précédente a tourné 14 itérations pour arriver au point d'équilibre.

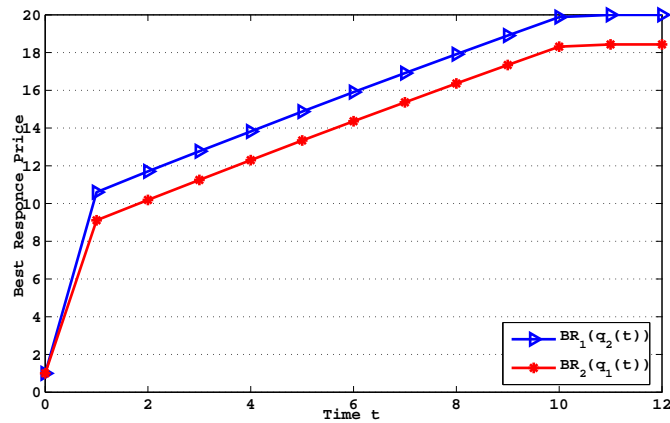


FIGURE 2.2 – Convergence vers le point d'équilibre pour le jeu de la QoS

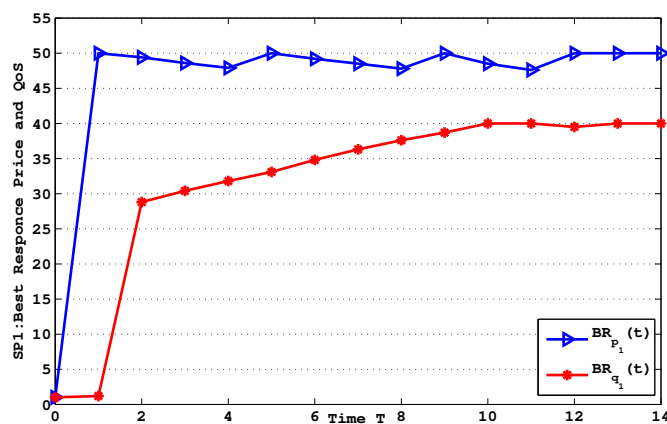


FIGURE 2.3 – Convergence vers l'équilibre de Nash de prix et de la QoS pour le fournisseur de service 1.

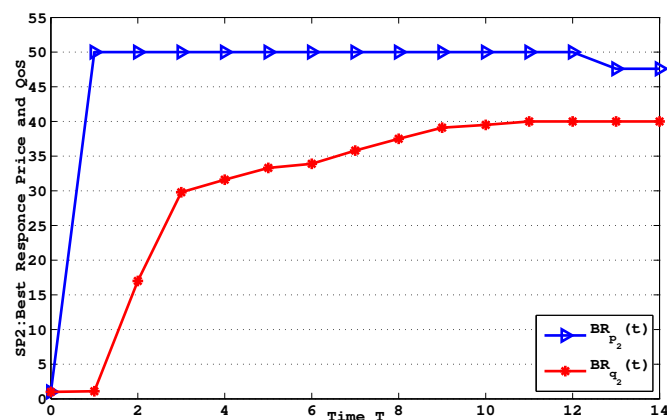


FIGURE 2.4 – Convergence vers l'équilibre de Nash de prix et de la QoS pour le fournisseur de service 2.

2.6.1 Impact du Degré d'Irrationalité des Utilisateurs sur le Prix à l'Équilibre

Dans cette simulation, nous avons subi une discrétisation à un pas régulier à l'intervalle de λ . La figure 2.5 montre l'influence du degré d'irrationalité sur l'équilibre des prix.

Dans l'intervalle où le degré d'irrationalité est faible ($\lambda < 0.35$), c'est à dire que le choix des utilisateurs est souvent rationnel; le fournisseur de service 1 qui commence le jeu avec des prix proportionnellement élevés, a diminué son prix pour attirer plus de clients (puisque'ils sont rationnels) et augmenté ses revenus. Alors que le fournisseur de service 2, qui commence le jeu avec des prix motivants, a commencé à augmenter doucement son prix pour assurer son profit. Et avec des degrés élevés d'irrationalité, les fournisseurs de services augmentent leurs prix sans se soucier de la stratégie de l'adversaire (le comportement égoïste) puisque la majorité des clients prennent des décisions d'abonnement d'une manière aléatoire(irrationnelle).

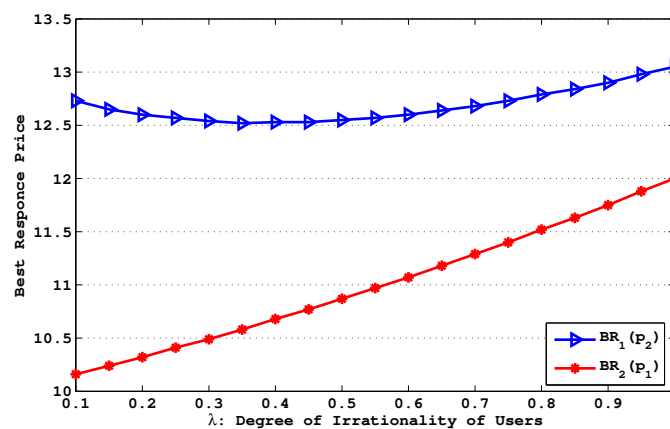


FIGURE 2.5 – Les prix à l'Équilibre en fonction du Degré d'Irrationalité des Clients

2.6.2 Influence du Coût Unitaire de la Bande Passante sur le Prix à l'Équilibre

Dans cette simulation, nous procédons à la discrétisation à pas régulier de l'intervalle de ϑ_i $i \in \{1, 2\}$. Figure 2.6 illustre l'influence du prix de l'unité de bande passante sur l'équilibre des prix. La figure montre clairement que lorsque le prix unitaire de bande passante augmente, tous les SPs sont obligés d'augmenter leurs stratégies de prix dans le but de conserver au moins leurs bénéfices actuels.

2.6.3 Influence du Degré de Rationalité des Clients sur leurs Revenus

Pour valider notre modèle des gains des clients dans le marché des télécommunications illustré dans l'équation 2.8, nous simulons les revenus des clients en variant le degré d'irrationalité. La figure 2.7 montre que lorsque les utilisateurs prennent des décisions rationnelles à propos des choix des SPs, leurs revenus augmentent. Alors que, lors d'un

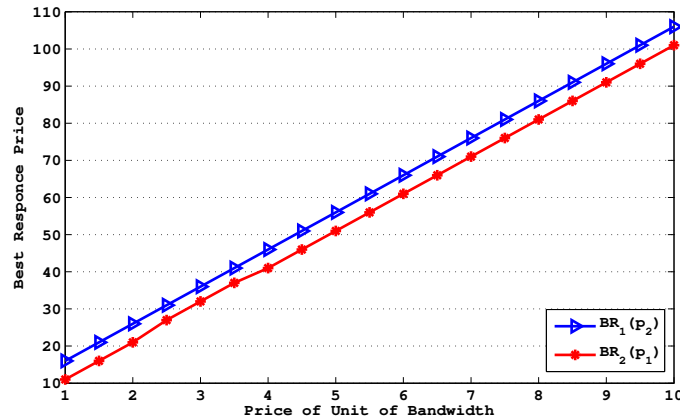


FIGURE 2.6 – Prix à l'équilibre en fonction du coût unitaire de la bande passante

choix aléatoire du SP par les utilisateurs, les revenus de ces derniers diminuent. En résumé, plus les clients sont déroutés par leurs fournisseurs de services, plus leurs revenus diminuent.

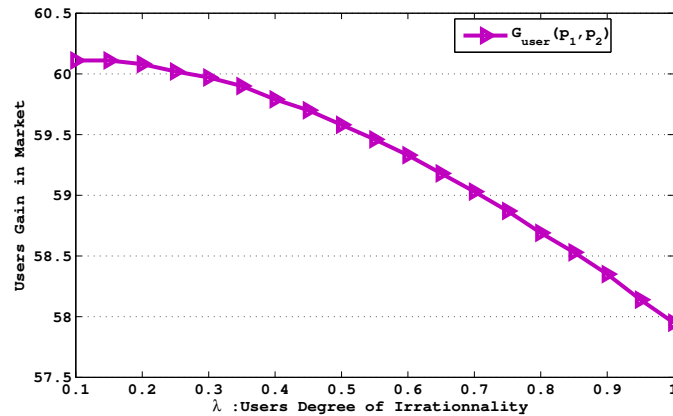
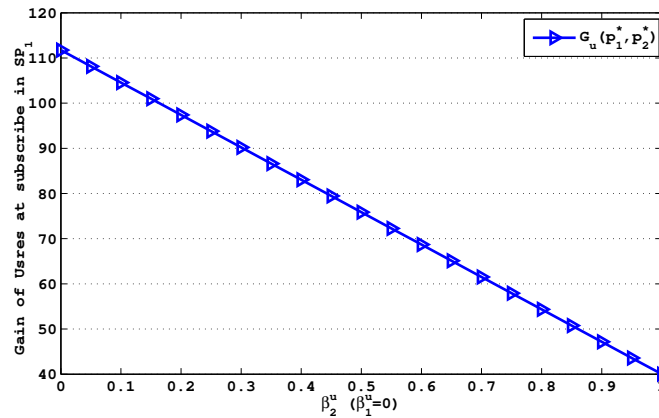


FIGURE 2.7 – Revenus des Clients en Fonction de Degré d'Irrationalité

2.6.4 Influence de la Sensibilité des Clients sur leurs Revenus

Dans cette section, nous considérons un utilisateur u qui souscrit aux services du SP 1 (ie $\beta_1^u = 0$) et on fait varier β_2^u la sensibilité de u à la stratégie de SP 2 pour voir son impact sur les revenus de u . Figure 2.8 trace les variations des revenus de u en fonction de β_2^u . On remarque que lorsque β_2^u augmente, les revenus de u diminuent. Ce résultat trouve son appui dans la réalité du marché des télécommunications, de sorte que lorsqu'un utilisateur s'abonne aux services d'un SP i et que le SP j présente des offres de service plus motivantes que le SP i , l'utilisateur se sent regretter ses choix.

FIGURE 2.8 – Revenus des clients en fonction de sa sensibilité β

2.6.5 Impact du Degré d'Irrationalité des Utilisateurs sur la QoS à l'Equilibre

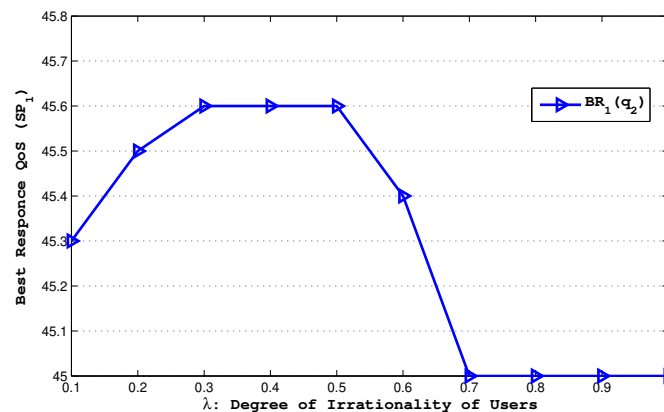


FIGURE 2.9 – QoS à l'équilibre en fonction de degré d'irrationalité

A partir de la figure 2.9, nous remarquons qu'il y a une influence du degré d'irrationalité des clients sur les réseaux de télécommunication, surtout quand on parle de la concurrence au niveau de la QoS. Lorsque les clients ne sont pas confus, c'est-à-dire qu'ils ont toutes les informations sur ce qui se passe dans le marché, (λ près de 0) les opérateurs devront améliorer la QoS ($\lambda < 0.3$: la rationalité des clients est très forte) pour assurer leur part du marché. Dès que l'information commence à apparaître, les clients ne disposent pas de toute l'information sur les stratégies des opérateurs, ce dernier bloc (lorsque $0,3 < \lambda < 0,5$ ou $0,7 < \lambda < 1$) ou diminue la QoS (lorsque $0,5 < \lambda < 0,7$) surtout si les prix sont assez bas pour maintenir un très bon ratio offre/investissement. Nous pouvons donc conclure que les SPs suivent leurs stratégies en observant le comportement des clients pour savoir s'ils ont de l'information sur ce qui les attend. Nous constatons également que la variation de la QoS n'est pas assez forte et compte tenu de l'impact du degré d'irrationalité sur

l'équilibre des prix, nous pouvons conclure que les stratégies des *SPs* s'entourent de quel prix pour quelle QoS et ce ratio (prix / QoS) qui est la source de la confusion des clients.

2.6.6 Efficacité de l'Equilibre

Dans cette partie, nous utiliserons le concept du prix anarchique présenté dans la section 2.4 pour discuter de l'efficacité de l'équilibre de Nash. La figure 2.10 montre la courbe de variation du PoA selon λ , qui représente le degré d'irrationalité de l'utilisateur. Dans cette figure, nous remarquons d'abord que le prix de l'anarchie augmente lorsque λ augmente. Lorsque le degré d'irrationalité est faible, c'est-à-dire que les utilisateurs prennent leurs décisions rationnellement, le prix de l'anarchie est faible. Pour tenir compte de cela, la somme des utilités optimales est supérieure à la somme des utilités à l'équilibre ; ce qui montre que les *SPs* sont égoïstes et que chacun cherche à maximiser son profit. Alors que dans le cas où le prix de l'anarchie approche 1, les *SPs* ne sont pas égoïstes et chacun prend en considération la stratégie de son adversaire pour finalement tomber dans l'état d'équilibre.

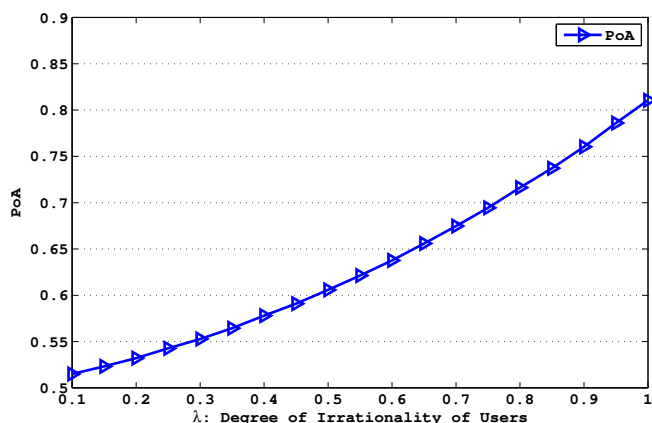


FIGURE 2.10 – Prix de l'Anarchie en Fonction du Degré d'Irrationalité

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé et étudié l'impact du comportement des clients et leur rationalité limitée dans les réseaux de télécommunications en utilisant l'outil mathématique de la théorie des jeux non coopératifs. D'abord, nous avons modélisé la concurrence entre les *PS* selon deux paramètres : le prix et la QoS en tenant compte de la probabilité de choisir les *PS*. Nous avons démontré l'existence et le caractère unique du prix d'équilibre de Nash et de la QoS, puis nous avons appliqué l'algorithme de meilleure réponse pour apprendre l'équilibre de Nash. Nous avons montré dans le premier cas que

les *SP* dans les réseaux de télécommunication ont un intérêt à embrouiller les clients, ce qui signifie que plus les clients sont irrationnels, plus les *SP* gagnent plus. Dans le second cas, le degré d'irrationalité a une forte influence sur les prix comme la QoS, qui montre que les clients sont intéressés par le rapport (prix / QoS) quel prix pour quel QoS.

Comme futur travaux de ce qui a été réalisé dans ce chapitre, nous proposons d'étudier ce système en prenant en compte la variation parallèle des deux paramètres QoS et Prix et en considérant la variabilité de la rationalité des clients c'est-à-dire en cherchant à modéliser la fonction de rationalité. La rationalité client est une fonction à modéliser en fonction d'un ensemble de paramètres tels que ceux liés au comportement du client lui-même et ceux liés aux offres piégées ou confuses par les *SPs* dans les réseaux de télécommunication.

Modélisation et Analyse de la Confusion dans les Réseaux de Communication

3.1 Introduction

L'analyse et l'étude du comportement des clients et de son impact sur les revenus des fournisseurs de services sur le marché des réseaux et des télécommunications deviennent ces dernières années un domaine plus attractif. La théorie des jeux est considérée comme un des outils mathématiques les plus utilisés dans ce domaine [6]. La confusion des consommateurs signifie perturber leur processus mental et les empêcher de prendre une décision optimale. Selon John V. Neumann et Morgenstern [97], une fois que l'information présentée aux consommateurs sur une offre d'abonnement est ambiguë ou incomplète, elle ne leur permet pas de rationaliser leur choix.

La croissance que le secteur des réseaux et des télécommunications a connue au cours des dernières années l'a rendu plus dynamique, et il est fort possible que les fournisseurs de services Internet dans ce domaine suivent des politiques ou des scénarios où la décision serait très difficile à prendre et où les clients seraient confrontés à une ambiguïté qui les rend plus confus. Cette confusion peut être définie comme la mesure dans laquelle un client peut traiter des offres de services homogènes qui ne sont pas claires ou ambiguës. En général, les clients peuvent être confus en raison de nombreux facteurs, tels que le manque de transparence des prix, l'ambiguïté de l'information ou la présentation erronée des offres, la complexité de l'environnement et une interprétation erronée [85, 23]. Ces différents facteurs sont à l'origine d'inexactitudes et d'incompréhensions de la part des consommateurs, et ont un effet important sur ses gains.

Dans les réseaux et les télécommunications, les fournisseurs de services Internet adaptent leurs stratégies décisionnelles à la situation du marché afin de réaliser le scénario optimal où les préférences et les besoins des clients sont satisfaits. Ces fournisseurs, qui sont censés être rationnels, offrent aux clients un ensemble de services caractérisés par le prix, la

qualité du service, les promotions, etc. qui peuvent être similaires entre différents ISP sur le marché. Cela conduit à une confusion probable et inquiétante du comportement des clients. La manière dont les ISP suivent la diffusion de la structure tarifaire est souvent très compliquée, les offres de fidélisation et de variation interservices rendent difficile pour les consommateurs de comprendre le type d'abonnement et d'obtenir le meilleur rapport prix-qualité.

Les fournisseurs de services dans les réseaux de télécommunications ont intérêt à créer plus de confusion [7] et à attirer l'attention de la partie des consommateurs confus sur leurs offres dans ce marché. Cette préoccupation crée un champ de concurrence entre ces fournisseurs de services Internet pour que les ISP se comportent comme un jeu non coopératif. Cette modélisation examinera l'effet des stratégies de prix et de qualité de service des ISP sur la prise de décision des clients.

Afin de clarifier l'objet de notre recherche, ce travail vise à répondre aux questions suivantes :

- Quel impact les stratégies de prix et de QoS des ISPs peuvent-elles avoir vis à vis la confusion des clients ?
- Quel est l'impact de la vitesse à laquelle le comportement du client change sur le processus de la prise de décision dans les entreprises de télécommunications ?

Ce chapitre est organisé comme suit : nous présenterons les travaux connexes dans la section 3.2. La formulation du problème par modélisation de la fonction d'utilité de chaque ISP dans l'écosystème étudié dans ce travail pour deux cas sans et avec contrainte de temporalité est décrite en détail dans la section 3.3. Ensuite, nous présentons l'analyse théorique du jeu non coopératif considéré dans cette étude et la méthode utilisée pour apprendre le point d'équilibre de Nash respectivement dans les sections 3.4 et 4.4. Enfin, nous donnons une analyse numérique obtenue sur les modèles proposés dans ce travail pour valider ce qui a été obtenu dans l'analyse théorique de la section 4.5 et nous concluons ce document avec des perspectives dans la section 3.7.

3.2 Travaux Connexes

La théorie des jeux a été largement utilisée dans les réseaux sans fil pour résoudre les problèmes de conflit et de coopération entre agents rationnels. Dans cette section, nous passons en revue quelques travaux remarquables dans ce domaine.

Dans le document [93], les auteurs ont traité le problème combiné de la sélection des fournisseurs de services Internet sans fil (WISP) par les clients mobiles et de l'attribution de puissance correspondante, afin de répondre aux attentes et à la satisfaction des uti-

lisateurs sur un marché concurrentiel des communications sans fil avec plusieurs WISP coexistants. Ainsi, dans les articles [94, 90], les auteurs décrivent que l'objectif du problème de la gestion des ressources est d'optimiser la satisfaction perçue des usagers en termes de qualité du service et de consommation énergétique. Ce sont des approches qui s'adaptent aux paradigmes centrés sur l'utilisateur.

Pour les travaux consacrés à l'étude du problème de la confusion des consommateurs et de leur rationalité limitée, nous avons constaté que dans le chapitre de M. Baslam [16], les auteurs ont présenté et analysé un cadre pour modéliser les interactions complexes entre les ISP en tant qu'acteurs à travers une classe de deux modèles d'équilibre de Nash à deux paramètres. Leur étude n'a pas pris en considération la rationalité limitée des clients. Dans l'ouvrage de S. Basov [17], l'auteur propose une modélisation de la confusion des acteurs. Le problème du choix d'un tel acteur dans le système est formulé par le modèle de Luce [49]. Également dans le livre [48], les auteurs débattent du concept de la confusion, affirmant que la prise de décision irrationnelle peut s'expliquer si l'on tient compte du fait que les capacités humaines à traiter les informations sont limitées. Ainsi, ils ont utilisé et amélioré des techniques heuristiques pour prédire la qualité de la décision en formulant et en résolvant des problèmes d'optimisation. L'étude dans le document [14] travaille sur le jeu du duopole avec une rationalité limitée tout en considérant le prix et la QoS comme paramètres stratégiques et en incluant les conditions de stabilité de l'équilibre de Nash. Les auteurs des articles [40, 66] ont introduit le concept de confusion des clients dans les réseaux de télécommunication et ont proposé un modèle de prix concurrentiel entre deux ISP rationnels. Ils ont conclu que les FSI ont intérêt à créer plus de confusion sur le marché et à profiter de la confusion des consommateurs pour réaliser un profit optimal. De même, les auteurs de l'article [7] ont proposé un modèle basé sur la pondération économique de Bertrand et le modèle de choix probabiliste de Luce [49]. Ils ont conclu que le consommateur est confus ou non par les FSI, et que si son degré d'irrationnalité augmente, le FSI gagne davantage. Ce modèle de choix de Luce est souvent plus compliqué que le modèle de choix discret qu'impliquent les auteurs de l'article [26]. Nous avons trouvé dans les travaux [25, 60] des auteurs ont proposé des modèles de prix supplémentaires dans lesquels les consommateurs disposent d'informations imparfaites sur les prix et doivent payer d'autres frais pour rechercher des informations complètes ; ils ont conclu que tant que l'incertitude est forte, la décision d'acquérir ces informations devient un complément stratégique. Dans le document [83], les auteurs ont démontré que les capacités de traitement des consommateurs ont une influence directe sur la satisfaction et la qualité de la décision.

Notre étude s'appuie sur des travaux antérieurs dans le domaine de la confusion des

consommateurs dans les réseaux de télécommunications [40]. En outre, nous proposons un nouveau modèle qui prend en charge les stratégies bidimensionnelles de tarification et de QoS des fournisseurs de services Internet en ajoutant la contrainte de temps qui rend la rationalité du client plus dynamique. Ce modèle, qui devrait être plus réaliste, permettra aux ISP de mieux comprendre le comportement des clients et de prévoir le degré de confusion des clients dans ce domaine.

3.3 Modélisation du Problème

Nous considérons un modèle de réseau hiérarchique avec N ISP et un nombre arbitraire d'utilisateurs finaux qui peuvent passer d'un fournisseur à un autre.

Les ISP fournissent aux clients une architecture qui leur permet d'accéder à des services hétérogènes tels que la navigation sur le Web, les services cloud, le streaming vidéo et audio, la visioconférence, les appels VoIP, etc. Un client qui décide d'utiliser les services du ISP i doit payer les frais de service connexes. Notez que la qualité du service doit être assurée à l'utilisateur payant.

La population comprend une partie des clients confus qui ne sont pas en mesure de faire un choix optimal et une deuxième partie des clients rationnels qui savent ce qui se passe sur le marché des réseaux et des télécommunications et ils ont toutes les informations nécessaires pour faire le choix des services qu'ils sont adaptés.

Le modèle de l'écosystème étudié est illustré à la figure 3.1 et se compose de deux parties : la première représente les fournisseurs de services Internet de télécommunication et leurs offres, et la seconde représente les populations de consommateurs. Les notations utilisées dans la formulation de notre modèle sont résumées dans le tableau 3.1.

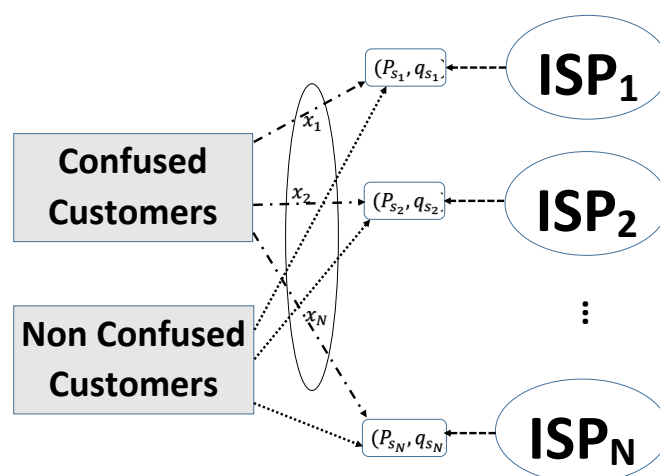


FIGURE 3.1 – Architecture de Modèle

TABLE 3.1 – Résumé des notations.

Notation	Description
N	Nombre de FAI
x_i	portion des consommateurs qui expriment leurs préférences aux services de ISP i en fonction d'autres critères ($\sum_i^I N x_i = 1$).
p_{s_i}	Prix d'accès réseau de ISP i
q_{s_i}	Qualité de service du ISP i
v_j	Unité du coût de la bande passante de la liaison
α_i^j	Sensibilité de ISP i au prix p_{s_j} de ISP j
β_i^j	Sensibilité de ISP i à la QoS q_{s_j} de ISP j
D_i	La demande du ISP i
B_i	Bande passante de backhaul nécessaire pour répondre aux demandes de FAI $_i$
λ	Proportion de consommateurs rationnels ($\lambda \in [0, 1]$).
ω	Représente la vitesse à laquelle les clients changent de comportement.
$Delay_i$	C'est le temps nécessaire à un bit de données pour parcourir le réseau d'un noeud ou d'un point d'extrémité à un autre dans le réseau du fournisseur de services Internet i .
D_{all}	Demande totale (tous les clients abonnés aux services de réseaux de télécommunication).

3.3.1 Modélisation de la Demande

D_i est la demande moyenne de tous les utilisateurs finaux abonnés aux services de ISP i , qui dépend du prix p_{s_j} et de la qualité de service q_{s_i} (voir [19] et [15]). Cette fonction de demande dépend également des prix $\mathbf{p}_{s_{-i}}$ et QoS $\mathbf{q}_{s_{-i}}$ fixés par les concurrents de FAI $_i$. Finalement, D_i diminue par rapport à p_{s_i} et augmente par rapport à p_{s_j} , $j \neq i$. Elle augmente par rapport à q_{s_i} et diminue par rapport à q_{s_j} , $j \neq i$.

Ensuite, la fonction de demande relatives aux services du ISP i peut être écrite comme

suit :

$$D_i = d_i^0 - \alpha_i^i p_{s_i} + \beta_i^i q_{s_i} + \sum_{j=1, j \neq i}^N (\alpha_i^j p_{s_j} - \beta_i^j q_{s_j}) \quad (3.1)$$

où d_i^0 est une constante positive utilisée pour assurer les demandes non négatives sur la région réalisable. Ainsi que α_i^j et β_i^j sont des constantes positives représentant respectivement la sensibilité de la demande D_i au prix et à la QoS du ISP j .

Hypothèse 3.1 *La sensibilité au prix des ISP α satisfait :*

$$\alpha_i^i \geq \sum_{j, j \neq i} \alpha_i^j, \quad \forall j, i = 1, \dots, N.$$

L'hypothèse 3.1 sera nécessaire pour assurer le caractère unique de l'équilibre de Nash. Cette hypothèse signifie que l'influence du prix du ISP sur sa demande est plus grande que l'influence des prix de ses opposants sur sa demande.

La demande totale sur le marché des réseaux et des télécommunications est la somme des demandes de tous les fournisseurs de services Internet :

$$D_{all} = \sum_{i=1}^N D_i \quad (3.2)$$

3.3.2 Modélisation de l'Utilité

L'utilité de l'ISP, désignée par U_i , est la différence entre les frais d'accès aux services réseau que chaque utilisateur paie au ISP (la fonction de revenu $R_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)$) moins le produit entre le coût de la bande passante du backhaul B_i pour assurer le service à la demande D et le coût unitaire v_i (la fonction $v_i B_i(\mathbf{q})$) :

$$U_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s) = R_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s) - v_i B_i(\mathbf{q}_s), \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (3.3)$$

Où la fonction de revenu $R_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s) = p_{s_i} D$ est le prix du service multiplié par le nombre de clients qui sont inscrits au ISP $_i$ avec $D = (x_i(1 - \lambda)D_{all} + \lambda D_i)$.

- si $\lambda = 0$ ce qui signifie que tous les clients sont totalement confus, alors la demande de ISP $_i$ est la portion x_i des clients qui expriment leurs préférences pour le service de ISP $_i$ multipliée par D_{all} la demande totale. Donc, dans ce cas $R_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s) = p_{s_i} x_i D_{all}$.
- si $\lambda = 1$ ce qui signifie que tous les clients sont rationnels et expriment leurs choix en fonction des stratégies des ISPs. La demande est donc celle exprimée dans l'équation 3.1 et le revenu dans ce cas est $R_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s) = p_{s_i} \cdot D_i$.

Soit B_i la quantité de bande passante requise par le ISP i qui dépend de la demande D et de la QoS q_{s_i} . v_i est le prix par unité de bande passante investie par le ISP i . Nous supposons que la QoS représente le "retard attendu", qui est calculée par la fonction Kleinrock [44] (voir [9]) comme la racine carrée du retard :

$$q_{s_i} = \frac{1}{\sqrt{Delay_i}} = \sqrt{B_i(D, q_{s_i}) - D}, \quad (3.4)$$

ça montre que :

$$B_i(D, q_{s_i}) = D + q_{s_i}^2 \quad (3.5)$$

La fonction d'utilité devient :

$$U_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s) = (p_{s_i} - v_i)(x_i(1 - \lambda)D_{all} + \lambda D_i) - v_i q_{s_i}^2 \quad (3.6)$$

3.3.3 Ajout de Temporalité au Modèle

Dans les réseaux et les télécommunications, le comportement des clients évolue au fil du temps. Un client confus aujourd'hui ne sera celui de l'avenir. Ainsi, la rationalité des clients dans ce domaine est souvent dynamique. Les fournisseurs d'accès Internet suivent des stratégies ambiguës pour publier leurs services afin d'embrouiller davantage de clients, car ces stratégies leur permettent d'avoir un gain optimal dans le marché [7]. Néanmoins, avec le temps, le client pourra retirer ce qui le rend confus, soit par expérience ou par sa réaction avec les autres clients,... Dans ce cas, il estime qu'il ne gagne rien à la stratégie de choix qu'il suit et ça l'oblige de réagir pour avoir des services plus répondus chez l'un des ISP.

Dans cette partie, nous modélisons la proportion de clients rationnels en la rattachant au paramètre temps. Nous considérons dans ce travail qu'à $t = 0$ toute la population du marché des réseaux et télécommunications est totalement confuse ($\lambda = 0$). Cette proportion est exprimée sous la forme suivante :

$$\lambda(t) = 1 - e^{-\omega t} \quad (3.7)$$

avec ω représente la vitesse à laquelle les utilisateurs changent leur comportement.

Notons que, lorsque $t = 0$, $\lambda = 0$ et lorsque $t = \infty$, $\lambda = 1$.

Pour effectuer l'analyse temporelle de la confusion des clients et de la façon dont la vitesse de changement de comportement réagit dans les réseaux et les télécommunications, nous considérons un facteur d'actualisation δ , de sorte qu'une unité monétaire en t ans

vaut $e^{-\delta t}$ unités monétaires de nos jours [53]. Un acteur ayant un revenu $U_i(t)$ au moment t peut prévoir ce revenu sur une période allant de 0 à T comme étant la moyenne des revenus actualisés pour cette période comme suit :

$$\begin{aligned}\bar{U}_i(T) &= \frac{1}{\int_0^T e^{-\delta t} dt} \int_0^T U_i(t) e^{-\delta t} dt \\ &= \frac{\delta}{1 - e^{-\delta T}} \int_0^T U_i(t) e^{-\delta t} dt \\ &= (p_{s_i} - v_i) \left[\frac{\delta (x_i D_{all} - D_i) (1 - e^{-(\omega + \delta)T})}{(\omega + \delta)(1 - e^{-\delta T})} + D_i \right] - v_i q_{s_i}^2\end{aligned}\quad (3.8)$$

3.4 Formulation du Jeu

Pour une formulation précise d'un jeu non coopératif, il convient de spécifier (i) le nombre de joueurs (ii) les actions possibles à la disposition de chaque acteur, ainsi que les contraintes qui peuvent en découler (iii) la fonction objective de chaque acteur qu'elle tente d'optimiser. Nous examinerons ici la formulation de jeu où les points (i) à (iii) ci-dessus sont pertinents.

Soit $G = [\mathcal{N}, \{P_{s_i}, Q_{s_i}\}, \{U_i(\cdot)\}]$ dénote le jeu non coopératif de prix et QoS (NPQG), où $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ est l'ensemble des indices identifiant les fournisseurs de services Internet, P_{s_i} est l'espace de stratégies de prix de l'ISP $_i$, Q_{s_i} est l'espace de stratégies de QoS pour l'ISP $_i$, et $U_i(\cdot)$ est la fonction d'utilité de l'ISP $_i$ qui est défini par l'équation 3.6 pour le premier cas et dans l'équation 3.8 pour le deuxième cas. Nous supposons que les espaces de stratégies P_{s_i} et Q_{s_i} pour chaque ISP $_i$ sont compacts et convexes avec des contraintes sur les extrémités maximales et minimales. Pour l'ISP $_i$ nous considérons les espaces de stratégies comme intervalles fermés $P_{s_i} = [\underline{p}_{s_i}, \bar{p}_{s_i}]$ et $Q_{s_i} = [\underline{q}_{s_i}, \bar{q}_{s_i}]$. Soit le vecteur de prix $\mathbf{p}_s = (p_{s_1}, \dots, p_{s_N})^T \in P_s^N = P_{s_1} \times P_{s_2} \times \dots \times P_{s_N}$, et le vecteur de QoS $\mathbf{q}_s = (q_{s_1}, \dots, q_{s_N})^T \in Q^{sN} = Q_{s_1} \times Q_{s_2} \times \dots \times Q_{s_N}$.

Afin de maximiser leurs utilités, chaque ISP $_i$ décide un prix p_{s_i} et QoS q_{s_i} . Formellement, le problème peut s'exprimer comme suit :

$$\max_{p_{s_i} \in P_{s_i}, q_{s_i} \in Q_{s_i}} U_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s), \quad \forall i \in \mathcal{N}. \quad (3.9)$$

3.4.1 Définition de l'Equilibre de Nash

L'équilibre de Nash est la solution la plus connue pour les jeux non coopératifs. L'équilibre de Nash est un point fixe d'un jeu non coopératif où aucun joueur ne peut pas augmenter la valeur de sa fonction d'utilité par une action individuelle.

Nous allons d'abord étudier la solution d'équilibre de Nash pour le jeu introduit. Nous montrerons qu'une solution d'équilibre de Nash existe et est unique. Rappelons qu'un jeu G non coopératif est appelé concave si les fonctions d'utilité de tous les joueurs sont strictement concaves par rapport à leurs stratégies correspondantes, [80].

Selon, [47] un équilibre de Nash est unique dans un jeu concave, si le jeu satisfait la condition de solvabilité dominante.

3.4.2 Analyser le Jeu sans Temporalité

3.4.2.1 Jeu à QoS fixe

Un JPQN pour un prix d'accès au réseau est défini pour $\mathbf{q}_s \in Q_s$ fixe comme $G_t(\mathbf{q}_s) = [\mathcal{N}, \{P_{s_i}\}, \{U_i(\cdot, \mathbf{q}_s)\}]$.

Définition 3.1 *Le vecteur de prix $\mathbf{p}_s^* = (p_{s_1}^*, \dots, p_{s_N}^*)$ est un équilibre de Nash pour le jeu à QoS fixe $G_t(\mathbf{q}_s)$ si*

$$\forall (i, p_{s_i}) \in (\mathcal{N}, P_{s_i}), \quad U_i(p_{s_i}^*, \mathbf{p}_{s_{-i}}^*, \mathbf{q}_s) \geq U_i(p_{s_i}, \mathbf{p}_{s_{-i}}^*, \mathbf{q}_s)$$

Théorème 3.1 *Pour chaque $\mathbf{q}_s \in Q_s$, le jeu $[\mathcal{N}, \{P_{s_i}\}, \{U_i(\cdot, \mathbf{q}_s)\}]$ admet un équilibre de Nash unique.*

Preuve. 7 *Pour prouver l'existence, nous notons que chaque espace stratégique des ISP P_{s_i} est défini par tous les prix dans l'intervalle fermé délimité par les prix minimum et maximum. Ainsi, l'espace de stratégie commune P est un sous-ensemble non vide, convexe et compact de l'espace euclidien R^N . De plus, les fonctions d'utilité sont concaves par rapport aux prix, comme on peut le voir en faisant le test sur la dérivée seconde :*

$$\frac{\partial^2 U_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)}{\partial p_{s_i}^2} = 2x_i(1 - \lambda) \left(-\alpha_i^i + \sum_{j,j \neq i} \alpha_j^i \right) - 2\lambda \alpha_i^i \leq 0. \quad (3.10)$$

qui assure l'existence d'un équilibre de Nash.

Nous utilisons la proposition suivante qui vaut pour un jeu concave [47](comme dans [30]) : Si un jeu concave satisfait la condition de solvabilité dominante :

$$-\frac{\partial^2 U_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)}{\partial p_{s_i}^2} - \sum_{j,j \neq i} \left| \frac{\partial^2 U_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)}{\partial p_{s_i} \partial p_{s_j}} \right| \geq 0 \quad (3.11)$$

alors le jeu G admet un équilibre de Nash unique.

La dérivée partielle mixte s'écrit comme :

$$\frac{\partial^2 U_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)}{\partial p_{s_i} \partial p_{s_j}} = x_i (1 - \lambda) \left(-\alpha_j^j + \sum_{k=1, k \neq j}^N \alpha_k^j \right) + \lambda \alpha_j^i \leq 0 \quad (3.12)$$

Après la substitution de l'équation 3.10 et l'équation 3.12 dans 3.11, nous avons :

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial^2 U_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)}{\partial p_{s_i}^2} - \sum_{j, j \neq i} \left| \frac{\partial^2 U_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)}{\partial p_{s_i} \partial p_{s_j}} \right| \\ &= -2x_i (1 - \lambda) \left(-\alpha_i^i + \sum_{j, j \neq i} \alpha_j^i \right) + 2\lambda \alpha_i^i \\ &+ \sum_{j, j \neq i} \left(x_i (1 - \lambda) \left(-\alpha_j^j + \sum_{k, k \neq j} \alpha_k^j \right) + \lambda \alpha_j^i \right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Mettons,

$$A = x_i (1 - \lambda) \left(2\alpha_i^i + \sum_{j, j \neq i} \sum_{k, k \neq j} \alpha_k^j \right) + \lambda \left(2\alpha_i^i + \sum_{j, j \neq i} \alpha_j^i \right)$$

$$B = x_i (1 - \lambda) \left(\sum_{j, j \neq i} \alpha_j^i + \sum_{j, j \neq i} \alpha_j^j \right)$$

si $A > B$ alors le point d'équilibre de Nash pour le jeu à QoS fixe est unique.

3.4.2.2 Jeu à Prix Fixe

Le JPQN de la QoS pour $\mathbf{p}_s \in P_s$ fixe, comme $G_t(\mathbf{p}_s) = [\mathcal{N}, \{Q_{s_i}\}, \{U_i(\mathbf{p}_s, \cdot)\}]$.

Définition 3.2 Le vecteur QoS $\mathbf{q}_s^* = (q_{s_1}^*, \dots, q_{s_N}^*)$ est un équilibre de Nash pour le jeu $G_t(\mathbf{p}_s)$ si

$$\forall (i, q_{s_i}) \in (\mathcal{N}, Q_{s_i}), \quad U_i(\mathbf{p}_s, q_{s_i}^*, \mathbf{q}_{s_{-i}}^*) \geq U_i(\mathbf{p}_s, q_{s_i}, \mathbf{q}_{s_{-i}}^*)$$

Théorème 3.2 Pour chaque $\mathbf{p}_s \in P_s$ le jeu $[\mathcal{N}, \{Q_{s_i}\}, \{U_i(\mathbf{p}_s, \cdot)\}]$ admet un équilibre de Nash unique.

Preuve. 8 Pour prouver l'existence, nous notons que chaque espace stratégique des ISP Q_{s_i} est défini par toutes les QoS dans l'intervalle fermé délimité par les QoS minimale et maximale. Ainsi, l'espace de stratégie commune Q_s est un sous-ensemble non vide, convexe et compact de l'espace euclidien R^N . De plus, les fonctions d'utilité sont concaves

par rapport aux QoSs, comme on peut le voir en faisant le calcul de la dérivée seconde :

$$\frac{\partial^2 U_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)}{\partial q_{s_i}^2} = -2v_i \leq 0. \quad (3.14)$$

La dérivée seconde est négative, ce qui montre l'existence de l'équilibre de Nash.

Pour démontrer l'unicité, nous suivons, [80], et définissons la somme pondérée des fonctions d'utilité des utilisateurs.

$$\psi(\mathbf{q}_s, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^N y_i U_i(q_{s_i}, \mathbf{q}_{s-i}) \quad (3.15)$$

Le pseudo-gradient de 3.15 est donné par :

$$v(\mathbf{q}_s, \mathbf{y}) = \left[y_1 \nabla U_1(q_{s_1}, \mathbf{q}_{s-1}), \dots, y_N \nabla U_N(q_{s_N}, \mathbf{q}_{s-N}) \right]^T \quad (3.16)$$

La matrice jacobienne J du pseudo-gradient (par rapport à la QoS) est écrite :

$$J = \begin{pmatrix} y_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial q_{s_1}^2} & y_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial q_{s_1} \partial q_{s_2}} & \cdot & \cdot & \cdot & y_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial q_{s_1} \partial q_{s_N}} \\ y_2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial q_{s_2} \partial q_{s_1}} & y_2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial q_{s_2}^2} & \cdot & \cdot & \cdot & y_2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial q_{s_2} \partial q_{s_N}} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ y_N \frac{\partial^2 U_N}{\partial q_{s_N} \partial q_{s_1}} & y_N \frac{\partial^2 U_N}{\partial q_{s_N} \partial q_{s_2}} & \cdot & \cdot & \cdot & y_N \frac{\partial^2 U_N}{\partial q_{s_N}^2} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -2y_1 v_1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & -2y_2 v_2 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & -2y_N v_N \end{pmatrix}$$

Ainsi, J est une matrice diagonale avec des éléments diagonaux négatifs. Cela implique que la matrice J est définie négative. Désormais $[J+J^T]$ est aussi définie négative, et selon le théorème (6) dans, [80], la somme pondérée des fonctions d'utilité $\psi(q_s, y)$ est strictement concave en diagonale. Ainsi, le point d'équilibre de Nash pour le jeu à prix fixe est unique.

3.4.3 Analyser le Jeu avec la Temporalité

3.4.3.1 Jeu à QoS fixe

Le JPQN de prix d'accès au réseau est défini pour $\mathbf{q}_s \in Q_s$ fixe, comme $G_T(\mathbf{q}_s) = [\mathcal{N}, \{P_{s_i}\}, \{\bar{U}_i(\cdot, \mathbf{q}_s)\}]$.

Définition 3.3 *Le vecteur de prix $\mathbf{p}_s^* = (p_{s_1}^*, \dots, p_{s_N}^*)$ est un équilibre de Nash pour le jeu à QoS fixe $G_T(\mathbf{q}_s)$ si*

$$\forall (i, p_{s_i}) \in (\mathcal{N}, P_{s_i}), \quad \bar{U}_i(p_{s_i}^*, \mathbf{p}_{s_{-i}}^*, \mathbf{q}_s) \geq \bar{U}_i(p_{s_i}, \mathbf{p}_{s_{-i}}^*, \mathbf{q}_s)$$

Théorème 3.3 *Pour chaque $\mathbf{q}_s \in Q_s$, le jeu $[\mathcal{N}, \{P_{s_i}\}, \{\bar{U}_i(\cdot, \mathbf{q}_s)\}]$ admet un équilibre de Nash unique.*

Preuve. 9 *Pour démontrer l'existence, nous notons que chaque espace stratégique des ISP P_{s_i} est défini par tous les prix dans l'intervalle fermé délimité par les prix minimum et maximum. Ainsi, l'espace de stratégie commune P est un sous-ensemble non vide, convexe et compact de l'espace euclidien R^N . De plus, les fonctions d'utilité sont concaves par rapport aux prix, comme on peut le voir en utilisant la dérivée seconde de l'utilité :*

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{U}_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)}{\partial p_{s_i}^2} = \\ \frac{2\delta \left(1 - e^{-(\delta+\omega)T}\right) \left(x_i \left(\sum_{j, j \neq i} \alpha_j^i - \alpha_i^i\right) - \alpha_i^i\right)}{(\delta + \omega) (1 - e^{-\delta T})} - 2\alpha_i^i \leq 0. \end{aligned} \quad (3.17)$$

ce qui montre l'existence de l'équilibre de Nash.

Nous utilisons la proposition suivante qui vaut pour un jeu concave [47] (comme dans [30]) : Si un jeu concave satisfait la condition de solvabilité dominante :

$$-\frac{\partial^2 U_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)}{\partial p_{s_i}^2} - \sum_{j, j \neq i} \left| \frac{\partial^2 \bar{U}_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)}{\partial p_{s_i} \partial p_{s_j}} \right| \geq 0 \quad (3.18)$$

donc le jeu G_T admet un équilibre de Nash unique.

La dérivée partielle mixte s'écrit comme :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{U}_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)}{\partial p_{s_i} \partial p_{s_j}} = \\ \frac{\delta \left(1 - e^{-(\delta+\omega)T}\right) \left(x_i \left(-\alpha_j^i + \sum_{k, k \neq j} \alpha_k^i\right) - \alpha_j^i\right)}{(\delta + \omega) (1 - e^{-\delta T})} + \alpha_j^i \leq 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Après la substitution de l'équation 3.17 et l'équation 3.19 dans 3.18, nous avons :

$$\begin{aligned}
& - \frac{\partial^2 \bar{U}_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)}{\partial p_{s_i}^2} - \sum_{j, j \neq i} \left| \frac{\partial^2 \bar{U}_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)}{\partial p_{s_i} \partial p_{s_j}} \right| \\
& = -2x_i (1 - \lambda) \left(-\alpha_i^i + \sum_{j, j \neq i} \alpha_j^i \right) + 2\lambda \alpha_i^i \\
& - \sum_{j, j \neq i} \left(x_i (1 - \lambda) \left(-\alpha_j^j + \sum_{k, k \neq j} \alpha_k^j \right) + \lambda \alpha_j^i \right) \tag{3.20}
\end{aligned}$$

Mettons,

$$\begin{aligned}
A_T & = \delta \left(1 - e^{-(\delta+\omega)T} \right) \left(2(x_i + 1) \alpha_i^i + \sum_{j, j \neq i} x_i \sum_{k, k \neq j} \alpha_k^j \right) \\
& + (\delta + \omega) \left(1 - e^{-\delta T} \right) \left(2\alpha_i^i \right)
\end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned}
B_T & = \delta \left(1 - e^{-(\delta+\omega)T} \right) \left(2(x_i + 1) \sum_{j, j \neq i} \alpha_j^i + \sum_{j, j \neq i} x_i \alpha_i^j \right) \\
& + (\delta + \omega) \left(1 - e^{-\delta T} \right) \sum_{j, j \neq i} \alpha_j^i
\end{aligned}$$

Si $A_T > B_T$ donc le point d'équilibre de Nash pour le jeux à QoS fixe est unique.

3.4.3.2 Jeu à Prix Fixe

Le JPQN de la QoS est défini pour le prix $\mathbf{p}_s \in P_s$ fixe comme $G_T(\mathbf{p}_s) = [\mathcal{N}, \{Q_{s_i}\}, \{\bar{U}_i(\mathbf{p}_s, \cdot)\}]$.

Définition 3.4 Le vecteur QoS $\mathbf{q}_s^* = (q_{s_1}^*, \dots, q_{s_N}^*)$ est un équilibre de Nash pour le jeu $G_T(\mathbf{p}_s)$ si

$$\forall (i, q_{s_i}) \in (\mathcal{N}, Q_{s_i}), \quad \bar{U}_i(\mathbf{p}_s, q_{s_i}^*, \mathbf{q}_{s_{-i}}^*) \geq \bar{U}_i(\mathbf{p}_s, q_{s_i}, \mathbf{q}_{s_{-i}}^*)$$

Théorème 3.4 Pour chaque $\mathbf{p}_s \in P_s$ pour le jeu $[\mathcal{N}, \{Q_{s_i}\}, \{\bar{U}_i(\mathbf{p}_s, \cdot)\}]$ admet un équilibre de Nash unique.

Preuve. 10 Pour prouver l'existence, nous notons que chaque espace de stratégies des ISP Q_{s_i} est défini par toutes les QoS dans l'intervalle fermé délimité par les QoS minimale et maximale. Ainsi, l'espace de stratégies commune Q_s est un sous-ensemble non vide,

convexe et compact de l'espace euclidien R^N . De plus, les fonctions d'utilité sont concaves par rapport aux QoSs, c'est ce qu'on peut vérifier en utilisant la dérivée seconde de l'utilité :

$$\frac{\partial^2 \bar{U}_i(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s)}{\partial q_{s_i}^2} = -2v_i \leq 0. \quad (3.21)$$

ce qui montre l'existence de l'équilibre de Nash pour ce jeu.

Afin de prouver l'unicité, nous suivons, [80], et définissons la somme pondérée des fonctions d'utilité des utilisateurs comme suit :

$$\psi(\mathbf{q}_s, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^N y_i \bar{U}_i(q_{s_i}, \mathbf{q}_{s-i}) \quad (3.22)$$

Le pseudo-gradient de 3.22 est donné par :

$$v(\mathbf{q}_s, \mathbf{y}) = \left[y_1 \nabla \bar{U}_1(q_{s_1}, \mathbf{q}_{s-1}), \dots, y_N \nabla \bar{U}_N(q_{s_N}, \mathbf{q}_{s-N}) \right]^T \quad (3.23)$$

La matrice jacobienne J du pseudo-gradient (par rapport à la QoS) est écrite :

$$J = \begin{pmatrix} y_1 \frac{\partial^2 \bar{U}_1}{\partial q_{s_1}^2} & y_1 \frac{\partial^2 \bar{U}_1}{\partial q_{s_1} \partial q_{s_2}} & \cdot & \cdot & \cdot & y_1 \frac{\partial^2 \bar{U}_1}{\partial q_{s_1} \partial q_{s_N}} \\ y_2 \frac{\partial^2 \bar{U}_2}{\partial q_{s_2} \partial q_{s_1}} & y_2 \frac{\partial^2 \bar{U}_2}{\partial q_{s_2}^2} & \cdot & \cdot & \cdot & y_2 \frac{\partial^2 \bar{U}_2}{\partial q_{s_2} \partial q_{s_N}} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ y_N \frac{\partial^2 \bar{U}_N}{\partial q_{s_N} \partial q_{s_1}} & y_N \frac{\partial^2 \bar{U}_N}{\partial q_{s_N} \partial q_{s_2}} & \cdot & \cdot & \cdot & y_N \frac{\partial^2 \bar{U}_N}{\partial q_{s_N}^2} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -2y_1 v_1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & -2y_2 v_2 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & -2y_N v_N \end{pmatrix}$$

Ainsi, J est une matrice diagonale avec des éléments diagonaux négatifs. Cela implique que la matrice J est définie négative. Désormais $[J+J^T]$ est aussi définie négative, et selon le théorème (6) dans, [80], la somme pondérée des fonctions d'utilité $\psi(q_s, y)$ est strictement concave en diagonale. Ainsi, le point d'équilibre de Nash pour le jeu à prix fixe est **unique**.

3.5 Apprentissage de l'Équilibre de Nash

3.5.1 Meilleure Réponse Dynamique

La meilleure réponse d'un joueur est définie comme sa stratégie optimale qui fait de lui un gain optimal compte tenu des stratégies des adversaires. La meilleure réponse dynamique d'un joueur, comme son nom l'indique, est d'adapter sa stratégie aux stratégies récentes des autres et sans tenir compte de l'effet des stratégies actuelles de tous les joueurs sur les futurs jeux.

Algorithm 2 Algorithme de la Meilleure Réponse Dynamique

- 1: **Initialisation** Le vecteur $a = [a_1, \dots, a_n]$ d'espace de stratégies.
 - 2: **Tant que** il existe i tel que $a_i \notin \operatorname{argmax}_{a \in A_i} (U_i(a, a_{-i}))$ **do**
 Set $a_i = \operatorname{argmax}_{a \in A_i} (U_i(a, a_{-i}))$.
 - Fin Tant que**
 - 3: **Arrêt** et retourner a .
-

Où a représente le vecteur p et q_s . A_i représente le prix du profil de politique P_{s_i} et le profil de politique QoS Q_{s_i} .

La complexité de cet algorithme dépend du nombre de joueurs N et de la taille de l'espace stratégique S . Pour apprendre l'équilibre de Nash pur, la complexité du meilleur algorithme de réponse dans le pire des cas est $\mathcal{O}(\|S\|^N)$. Ce qui fait, il est nécessaire de vérifier toutes les combinaisons de N joueurs et les stratégies $\|S\|$.

3.5.2 Prix de l'Anarchie

Le concept de prix de l'anarchie est une mesure prise par Koutsoupias et Papadimitriou [46] pour quantifier l'inefficacité de l'équilibre de Nash, qui est causé par le comportement égoïste des acteurs du système. Cette mesure est définie comme le rapport du pire cas entre le coût d'un équilibre de Nash et le coût d'un système optimal. Ce dernier est défini comme le maximum de la somme des utilités de tous les acteurs des systèmes :

$$POA = \frac{\min_{a, a_{-i}} W_{NE}(a, a_{-i})}{\max_{a, a_{-i}} W(a, a_{-i})} \quad (3.24)$$

où $W(a, a_{-i}) = \sum_{i=1}^N U_i(a, a_{-i})$ est une fonction du bien-être et $W_{NE}(a, a_{-i}) = \sum_{i=1}^N U_i(a^*, a_{-i})$ est une somme des services publics de tous les acteurs en équilibre Nash.

3.6 Résultats Numériques

Dans cette section, nous présentons une étude numérique du jeu prenant en compte les expressions précédentes des utilités dans les différents cas étudiés dans cet ouvrage. Cette étude numérique est le résultat de l'utilisation de l'algorithme de la meilleur réponse dynamique 2 qui est illustré dans la section précédente. A titre d'illustration, nous considérons un écosystème contenant deux ISP homogènes cherchant à maximiser leurs revenus.

3.6.1 Cas sans Temporalité

3.6.1.1 Convergence vers l'Équilibre de Nash

Les courbes tracées dans les figures 3.2 et 3.3 montrent que l'équilibre de Nash du jeu de prix (respectivement QoS) est unique et cela reflète ce que nous avons trouvé dans l'étude théorique du caractère unique de l'équilibre de Nash. La première figure montre que l'algorithme a tourné 15 itérations pour arriver au point d'équilibre des prix. Cependant, dans la deuxième figure, cet algorithme n'a besoin que de deux itérations pour converger au point d'équilibre de la QoS.

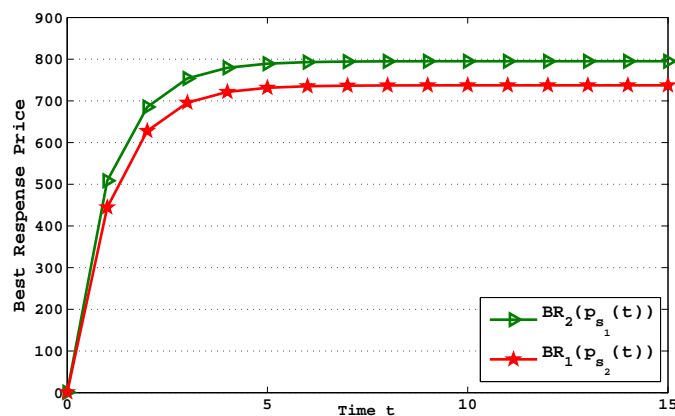


FIGURE 3.2 – Convergence vers l'équilibre de Nash de prix

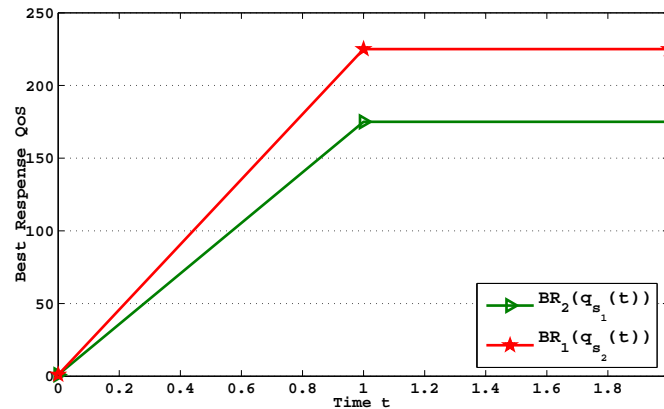


FIGURE 3.3 – Convergence vers l'équilibre de Nash pour le jeu de QoS

3.6.1.2 Impact de λ sur le point d'équilibre

Dans cette simulation, nous avons subi une discrétisation, à pas régulier, à l'intervalle de λ . Dans les figures 3.4 et 3.5, nous montrons l'influence de la part des clients rationnels sur l'équilibre des prix et de la QoS. A partir de ces deux figures, nous constatons que lorsque les abonnés deviennent rationnels, c'est-à-dire qu'ils disposent de toutes les informations sur les offres des fournisseurs de services. Dans ce cas, leur choix devient rationnel et le fournisseur de services doit baisser les prix et améliorer la qualité du service pour attirer davantage plus d'abonnés à s'inscrire à ses services. Nous montrons ainsi qu'il existe un lien entre la rationalité limitée des clients et les stratégies des fournisseurs de services dans les réseaux de télécommunications.

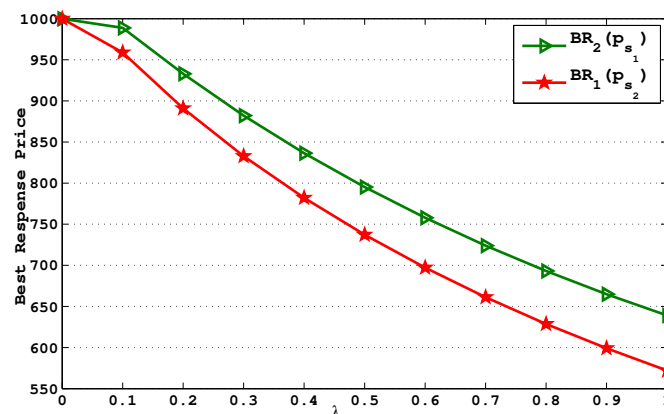


FIGURE 3.4 – Prix à l'Equilibre en Fonction de la Proportion de Clients Rationnels

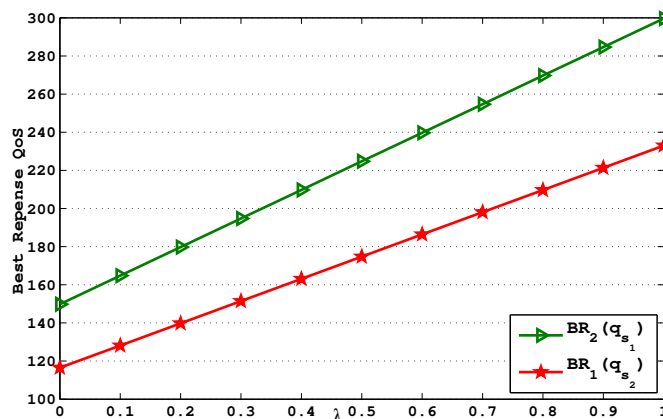
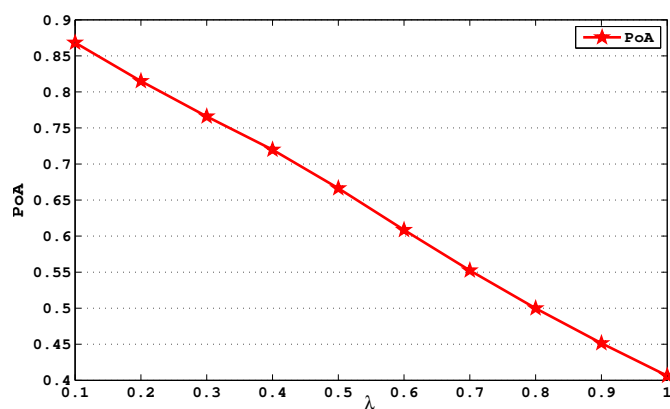


FIGURE 3.5 – QoS à l'Equilibre en Fonction de la Proportion de Clients Rationnels

3.6.1.3 Efficacité d'équilibre pour le jeu G

Dans cette partie, nous utiliserons le concept du prix de l'anarchie présenté dans la section 4.4 pour discuter de l'efficacité de l'équilibre de Nash. La figure 3.6 la courbe du prix de l'anarchie en fonction du λ qui représente la part des clients rationnels. On note à partir de cette figure que lorsque λ augmente le prix de l'anarchie diminue ; ce qui montre que lorsque les clients sont confus, le prix de l'anarchie tend à 1, donc les ISP prennent leurs décisions en prenant en compte les stratégies de leurs adversaires, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas égoïstes. Cependant, lorsque les clients deviennent progressivement rationnels, le jeu tend vers une situation de monopole où chaque ISP cherche à obtenir un profit optimal sans prendre en compte les stratégies des adversaires (le comportement égoïste).

FIGURE 3.6 – Prix de l'Anarchie en Fonction de la Proportion de Clients Rationnels λ

3.6.2 Cas avec Temporalité

3.6.2.1 Convergence vers le Point d'Equilibre

Dans cette simulation, nous notons que l'utilité étudiée est la moyenne des utilités tout au long de la période $[0, T]$ avec un facteur d'actualisation δ et que le prix et la QoS ne sont pas modélisés en fonction du temps t . Nous notons dans les figures 3.7 et 3.8 que l'algorithme de la meilleure réponse converge vers le point d'équilibre qui est unique dans ce jeu, comme la situation de convergence mentionnée dans la première partie.

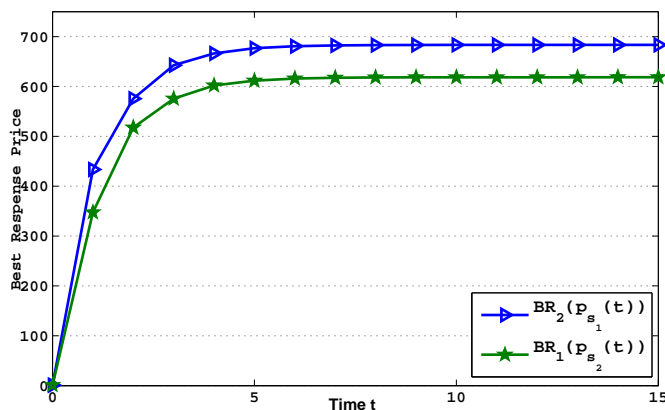


FIGURE 3.7 – Convergence vers le Point d'Equilibre de Nash

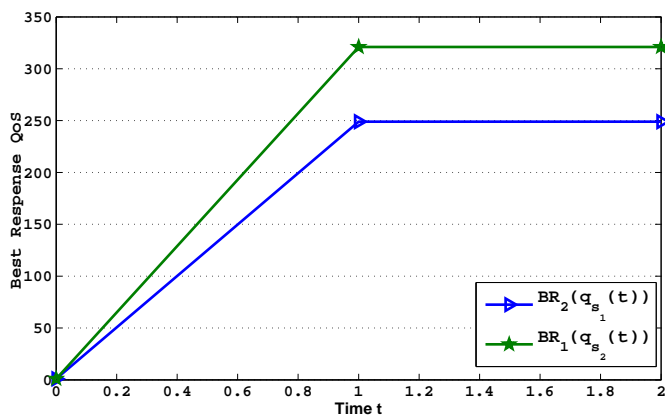


FIGURE 3.8 – Convergence vers l'équilibre de Nash pour le jeu G_t à prix fixe

3.6.2.2 Impact de ω sur le Point d'Equilibre

Dans cette simulation, nous avons subi une discrétisation, à pas régulier, à l'intervalle de ω . Les figures 3.9 et 3.10 montrent l'influence de la vitesse de changement de comportement des clients respectivement sur l'équilibre prix et QoS. A partir de ces deux chiffres, nous remarquons que lorsque la vitesse à laquelle les clients changent leur comportement augmente, les ISP devront baisser le prix et améliorer la QoS, parce que les

clients changent leur comportement d'une stratégie actuelle plus faible à une autre stratégie plus motivante qui leur permet de se rassembler davantage sur le marché, d'où le changement positif dans leur rationalité.

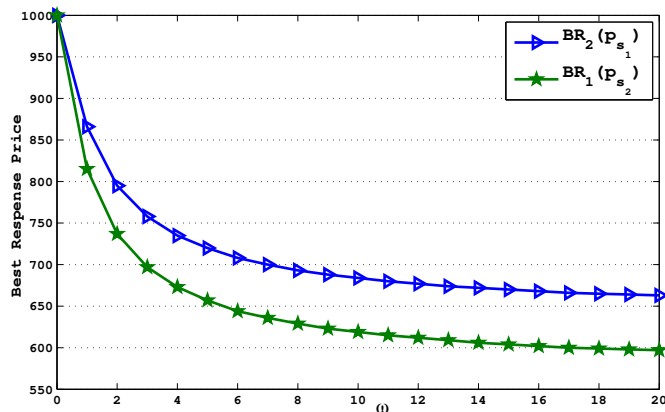


FIGURE 3.9 – Prix à d'équilibre par rapport à la vitesse du changement de comportement ω

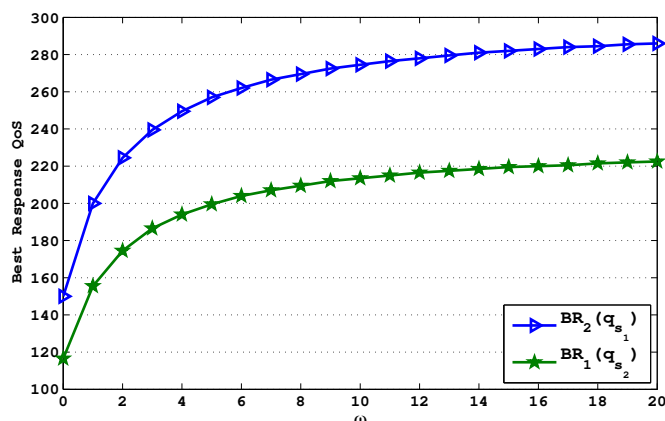


FIGURE 3.10 – QoS à d'équilibre par rapport à la vitesse du changement de comportement ω

3.6.2.3 Efficacité de l'Equilibre pour le Jeu G_T

Cette partie représente la variation du prix de l'anarchie en fonction de la vitesse de changement de comportement des consommateurs. La figure 3.11 montre que pour des taux plus faibles de changement de comportement, le prix de l'anarchie tend à 1 et la situation du jeu est très oligopolistique, c'est-à-dire sans égoïsme sur le marché. Si la vitesse du changement est assez grande, le jeu tend vers une situation de monopole où chaque acteur cherche à maximiser son profit indépendamment des autres et ce qui le rend égoïste.

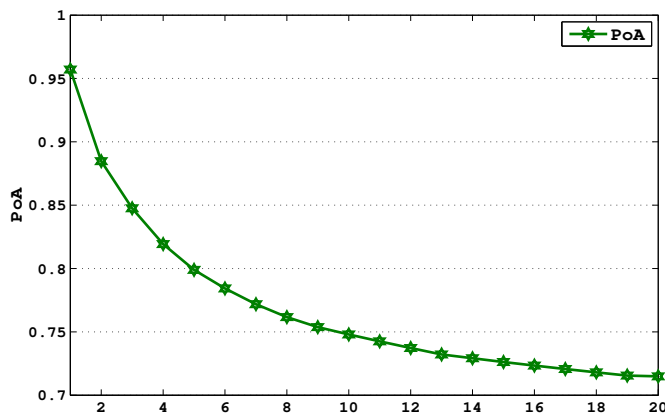


FIGURE 3.11 – Prix de l’Anarchie par rapport à la vitesse du changement de comportement ω

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé et analysé les interactions entre les ISPs dans le domaine des réseaux et des télécommunications. Cette étude nous a amenés à concevoir un jeu non coopératif entre les ISPs en présence de la notion de confusion que l’on peut créer chez les clients. Dans ce travail, nous avons discuté le concept de la confusion (rationalité) dans deux cas où le paramètre de temporalité qui se diffère entre eux. Après avoir démontré l’existence et l’unicité de l’équilibre de Nash pour le jeu dans les deux cas, nous avons utilisé l’algorithme de la meilleure réponse pour l’apprentissage de l’équilibre de Nash, et nous avons montré numériquement que le jeu converge vers cet équilibre. Nous avons appris de ce travail que lorsque les clients sont confus, les fournisseurs de services Internet leur offrent des prix élevés et une faible qualité de service, tandis que lorsque le comportement des clients commence à changer assez rapidement, les ISP commencent à faire des offres plus motivantes pour garder leur part du marché et augmenter leur demande.

Dans le cadre de travaux futurs, nous prévoyons d’analyser l’impact de la rationalité des clients sur la coopération qui pourrait exister entre les fournisseurs de services Internet et leurs revenus au cours d’une période donnée. Ainsi, exploiter notre modélisation de la rationalité en fonction du temps dans le cas où la demande n’est pas linéaire.

Fournisseurs de Réseaux de la Distribution du Contenu Internet et l'Amélioration de la QoS

4.1 Introduction

La distribution de contenu et la limitation de la congestion du réseau Internet font l'objet de nombreuses recherches dans le domaine des réseaux de télécommunication. Ce problème de congestion survient lorsqu'un contenu stocké dans le serveur d'origine du fournisseur de contenu fait l'objet d'un très grand nombre de requêtes ce qui rend la réponse plus lente. Ces études sont faites pour réduire le temps de réponse (latence) et ainsi assurer la distribution du contenu avec une meilleure QoS aux utilisateurs finaux, ce qui entoure le problème de congestion du trafic sur le réseau [82]. Parmi les solutions les plus efficaces figure l'utilisation des réseaux de distribution de contenu en tant qu'acteurs importants dans la chaîne de distribution de contenu. Ces réseaux sont déployés de telle sorte qu'un serveur original est connecté aux autres serveurs de réplication de contenu qui permettent de cacher des copies du contenu demandé par la population qu'ils couvrent. Le mécanisme de fonctionnement de base d'un réseau de distribution de contenu (*CDN*) est le fait que la première requête sur un contenu est servie par le serveur d'origine et immédiatement ce contenu sera transféré au serveur de réplication de contenu qui est dans la zone de couverture de la requête pour servir les futures requêtes sur le même contenu et il réduit le problème de congestion, qui revient dans le réseau "backhaul" et améliore la QoE (qualité d'expérience) des utilisateurs finaux.

Selon [71], les clients des réseaux de distribution de contenu *CDN* sont les utilisateurs finaux, les fournisseurs de contenu *CP*, les fournisseurs de services Internet, les opérateurs mobiles,... etc. L'utilisateur final est l'entité qui consomme le contenu (vidéo, page Web, musique, etc.) du fournisseur de contenu. Le fournisseur de contenu (par exemple : YouTube, Hulu, Dailymotion, ...) est l'entité qui possède le contenu ou qui a obtenu les droits pour le vendre. Le fournisseur de CDN (par exemple : Akamai, Azure, Level 3, ...)

est l'entité qui dispose de serveurs de réplication à des endroits stratégiques et fournit des services de diffusion de contenu aux fournisseurs de contenu. Les relations existantes entre ces acteurs sont des relations d'affaires telles que l'achat de contenu d'un fournisseur de contenu *CP* par un utilisateur final. Les frais d'hébergement du contenu par le fournisseur *CDN* sont payés par le fournisseur de contenu. Ces relations les ont forcés à rechercher des services plus satisfaisants à des prix modérément acceptables pour faire des profits et survivre. Cela nécessite de nombreuses études dans ce domaine et notre contribution s'inscrit dans ce cadre.

Dans les articles [59, 57, 36, 92], les auteurs étudient le concept de neutralité d'Internet et son implication sur les différents niveaux de la chaîne de distribution de contenu en prenant en compte la participation de plusieurs CDNs dans ce processus. Ils ont étudié le système avec un seul acteur du CDN qui cherche à maximiser son revenu en modélisant mathématiquement ce modèle en fonction de paramètres tels que le service, le transport et les prix de stockage. Cette diversité d'acteurs conduit à une forte concurrence entre eux, ce qui n'est pas étudié dans ces œuvres. Les auteurs de l'ouvrage [86] ont discuté des différents paramètres qui pourraient influencer l'utilité d'un CDN comme la politique tarifaire qu'il suit, la popularité du contenu qu'il stocke sur les serveurs de la réplication de contenu (c'est-à-dire la demande du contenu) et la QoS qu'il offre à ces clients (CP, Utilisateurs, etc.). Dans l'article [51], les auteurs analysent le cas d'un écosystème où les utilisateurs veulent bénéficier du contenu offert par un fournisseur de contenu et où l'accès au service se fait par l'intermédiaire de deux ISP qui prennent en considération trois cas pour la livraison du contenu. Le premier cas, sans utiliser le CDN, signifie que la livraison se fera directement via le serveur d'origine du CP. Dans le second cas, la distribution est assurée par un CDN indépendant. Le troisième cas est celui où le CDN devient une entité intégrée dans l'un des fournisseurs d'accès Internet (Hosting CDN). Les auteurs de cet article ont conclu que les utilisateurs sont satisfaits de l'utilisation des CDN. Cependant, lorsqu'il s'agit de ISP, il serait préférable d'exploiter un CDN indépendant afin de ne pas perdre trop en ajoutant des frais pour l'installation d'un CDN d'hébergement. L'accélération de la diffusion des contenus diversifiés sur Internet et offrir des performances de qualité est l'un des objectifs majeurs de la chaîne de distribution de contenus. A cet effet, les auteurs de l'ouvrage [88] ont décrit la force de la mise en œuvre des CDN et leur place très importante dans le problème de la distribution des contenus. Ils ont donc discuté des différentes architectures de *CDNs* et de leurs implications pour les marchés de l'interconnexion. Ils ont conclu, selon Cisco [1], que 70% du trafic Internet passera par le CDN en 2021, contre 52% en 2016.

Des travaux antérieurs ont étudié les relations entre les acteurs de la chaîne de distri-

bution de contenus sur Internet. Mais les écosystèmes analysés à chaque fois ont abouti à l'existence d'un seul fournisseur de réseau de distribution de contenu *CDN*. Ce n'est pas du tout le cas, car on remarque actuellement plusieurs nouveaux *CDN* commerciaux et ce qui représente un environnement concurrentiel puisque chacun d'entre eux cherche à maximiser ses profits. L'optimisation du profit est liée à la stratégie que chaque fournisseur *CDN* cherche à atteindre son objectif. Cela dépend du prix qu'il propose aux fournisseurs de contenu. L'objectif est de distribuer leur contenu et la QoS qui est basée sur la taille des caches et le nombre de serveurs de réplication de contenu exploités, ce qui signifie le taux de couverture des requêtes des utilisateurs dans différentes régions du monde. Cependant, notre contribution est d'étudier et d'analyser un écosystème où nous avons plusieurs fournisseurs de contenu *CPs* qui sélectionneront les fournisseurs *CDNs* les plus appropriés et ceux qui atteignent leurs objectifs dans la chaîne de distribution de contenu. Le choix est un déversement de leurs propres stratégies et de celles des fournisseurs de *CDN*. Un fournisseur *CDN* peut servir un ou plusieurs fournisseurs de contenu *CPs*.

Ce chapitre est structuré comme suit : Dans la section 4.2, nous présentons la formulation du problème en modélisant l'interaction existant à différents niveaux du pseudo-écosystème étudié. Ensuite, nous présentons l'analyse théorique des jeux non coopératifs considérés dans cette étude dans la section 4.3 et décrivons dans la section 4.4 la méthode utilisée pour apprendre le point d'équilibre de Nash. Enfin, nous donnons une analyse numérique obtenue sur les modèles proposés dans ce travail pour valider ce qui a été obtenu dans l'analyse théorique de la section 4.5 et nous concluons ce chapitre dans la section 4.6.

4.2 Modélisation du Problème

Dans cette section, nous procédons à la modélisation du problème en considérant les acteurs qui peuvent intervenir aux différents niveaux de la chaîne de distribution de contenus Internet. Les fournisseurs de contenu (*CPs*) qui fournissent du contenu aux utilisateurs finaux avec un certain prix P^c et une qualité du contenu q^c . Les fournisseurs de réseaux de distribution de contenu (*CDNs*) sont des entités qui stockent le contenu de *CP* dans des caches de serveur placées près des utilisateurs finaux. Ces serveurs permettent le chargement et le téléchargement de contenu avec une QoS satisfaisante et un prix P que le *CP* doit payer à *CDN*. fournisseurs de services *SPs* permettent aux utilisateurs finaux d'accéder au contenu avec des frais qui ne sont pas pris en compte dans cette étude et les utilisateurs finaux qui sont l'objectif de la chaîne de distribution du contenu.

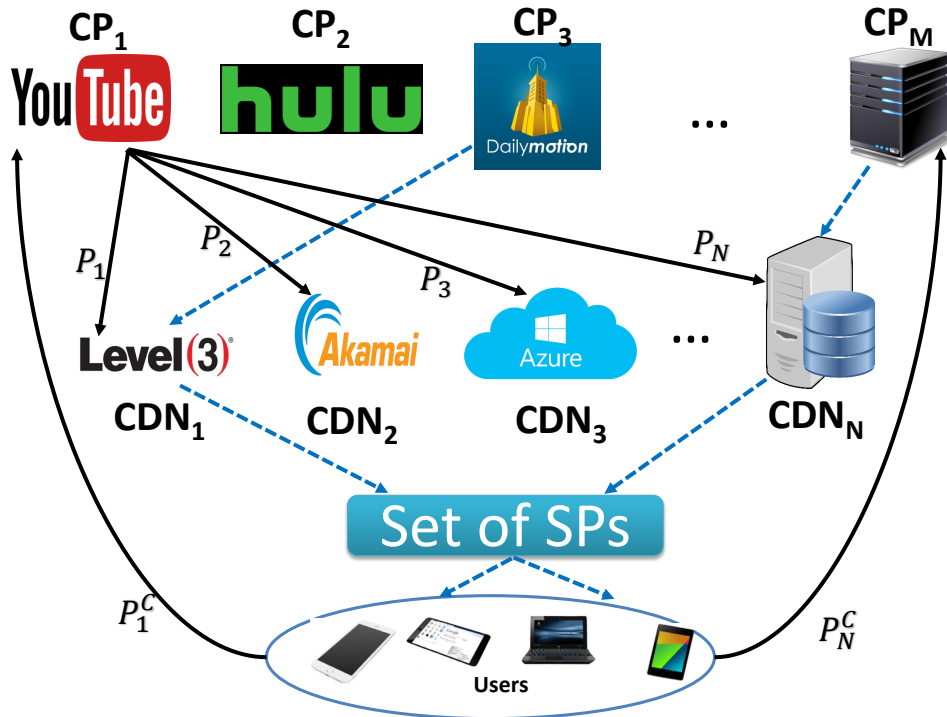


FIGURE 4.1 – Représentation des relations entre les acteurs de la chaîne de diffusion de contenu Internet. Les flèches simples représentent des transactions monétaires. Les flèches en pointillés représentent la transmission des données du CP via CDN aux utilisateurs finaux.

La figure 4.1 représente les différents acteurs utilisés dans la chaîne de diffusion de contenu. Notre contribution se concentre sur un modèle restreint qui analyse l'interaction entre les fournisseurs de CDN et les CP. Nous considérons un système avec N fournisseurs de type CDN et M fournisseurs de type CP . p_i et q_i^s représentent respectivement le prix et la qualité de service garantis par $CDN_i \forall i \in \{1, \dots, N\}$. p_j^c et q_j^c représentent le prix d'accès au contenu et la qualité du contenu assuré par $CP_j \forall j \in \{1, \dots, M\}$.

4.2.1 Modélisation de la Demande

La modélisation de la demande d'un acteur dans les réseaux de télécommunication est une sorte de représentation de sa part, dans le marché, des clients qui sont inscrits dans leurs services. Pour simplifier, la demande D_{ij} de CDN_i et CP_j est écrite comme une fonction qui dépend des paramètres de décision et est supposée linéaire (comme la procédure suivie par l'auteur du document [15]) par rapport au prix p_i , la QoS q_i^s promise, le prix du contenu p_j^c et la qualité du contenu q_j^c . Cette fonction de demande dépend aussi des prix \mathbf{p}_{-i} , QoS \mathbf{q}_{-i}^s , prix du contenu \mathbf{p}_{-j}^c et la qualité du contenu \mathbf{q}_{-j}^c fixés par les concurrents. Finalement, D_{ij} diminue par rapport à p_i , p_j^c et augmente par rapport à p_n , $n \neq i, p_k^c$, $k \neq j$... Alors qu'il augmente par rapport à q_i^s , q_j^c et diminue par rapport

$q_n^s, n \neq i, q_k^c, k \neq j$.

Ensuite, la fonction de la demande relative aux fournisseurs CDN_i et CP_j peut être écrite comme suit :

$$D_{ij}(\mathbf{p}, \mathbf{q}^s, \mathbf{p}^c, \mathbf{q}^c) = d_i^0 - \alpha_i^i p_i + \beta_i^i q_i^s - \lambda_j^j p_j + \gamma_j^j q_j^c + \sum_{n, n \neq i} (\alpha_i^n p_n - \beta_i^n q_n^s) + \sum_{k, k \neq j} (\lambda_j^k p_k^c - \gamma_j^k q_k^c), \quad \forall n \in \{1, \dots, N\}, \quad \forall k \in \{1, \dots, M\} \quad (4.1)$$

où d_i^0 est une constante positive utilisée pour assurer les demandes non négatives sur la région réalisable. Tandis que α_i^n et β_i^n sont des constantes positives représentant respectivement la sensibilité du fournisseur CDN i au prix et la QoS du fournisseur CDN n . λ_j^k et γ_j^k sont des constantes positives représentant respectivement la sensibilité du fournisseur de contenu j au prix du contenu et la qualité du contenu du fournisseur k .

Les contraintes sur les coefficients présentés dans la fonction de la demande sont les suivantes : $\sum_{n=1}^N \alpha_i^n = 1$, $\sum_{n=1}^N \beta_i^n = 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}$; $\sum_{k=1}^M \lambda_j^k = 1$, $\sum_{k=1}^M \gamma_j^k = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, M\}$

Hypothèse 4.1

$$\alpha_i^i \geq \sum_{n, n \neq i} \alpha_i^n, \quad \forall n, i = 1, \dots, N \quad (4.2)$$

Cette condition sera nécessaire pour assurer le caractère unique de l'équilibre de Nash.

Cette hypothèse 4.1 signifie que l'influence du prix décidé par CDN_i sur sa demande est supérieure à la somme des influences des prix décidés par les concurrents CDN_{-i} sur sa demande.

4.2.2 Modèle de la Demande du CDN

La demande de CDN_i est la somme de toutes les demandes de CPs qu'il a servies aux utilisateurs finaux, et est exprimée comme suit :

$$D_{CDN_i} = \sum_{j=1}^M D_{ij} \quad (4.3)$$

4.2.3 Modèle de la Demande du CP

La demande du CP_j est la somme de leurs demandes servies par chaque CDN_i for all $i \in \{1, \dots, N\}$, elle est exprimée par :

$$D_{CP_j} = \sum_{i=1}^N D_{ij} \quad (4.4)$$

4.2.4 Utilité du Fournisseur CDN

L'utilité (bénéfice net) d'un CDN_i commercial est la différence entre le revenu total et les coûts d'investissement, dont le but est d'assurer une QoS satisfaisante pour les utilisateurs finaux. Il représente son intervention pour améliorer la bande passante Φ de SPs en mettant le contenu sur des serveurs proches des utilisateurs et sans oublier la taille de l'espace de stockage dédié pour mettre en cache le contenu de CPs . Le revenu total R_i de CDN_i est basé sur le prix qu'il offre CPs pour la livraison de leur contenu et sur sa demande D_{CDN_i} ainsi que sur sa part du revenu CPs relié au prix du contenu qu'il offre aux utilisateurs. Elle s'exprime comme suit :

$$R_i = p_i \cdot D_{CDN_i} + \sum_{j=1}^M f_{ij} \cdot p_j^c \cdot D_{ij} \quad (4.5)$$

avec $f_{ij} \in [0, 1]$ représente une partie des revenus du CP_j qui sont gagnés via sa demande délivrée par le CDN_i .

Hypothèse 4.2

$$\sum_{i=1}^N f_{ij} < 1, \quad \forall j \in \mathcal{M} \quad (4.6)$$

Cette condition est souvent réaliste parce que : si $\sum_{i=1}^N f_{ij} = 1$ alors $U_{CP_j} < 0$ ce qui signifie que CP_j partage tout ce qu'il gagne avec $CDNs$ et fortement ce n'est pas le cas.

Le coût d'un CDN est lié à la taille du cache fourni pour stocker le contenu des CPs et au nombre de serveurs de réplication utilisés pour garder le contenu à proximité des utilisateurs finaux. Ces opportunités que le CDN offre aux CPs ont pour but d'améliorer la QoS perçue par les utilisateurs en limitant les problèmes de congestion, surtout s'il s'agit d'une requête sur une vidéo en direct (vidéo streaming). Le coût C_i est donc formulé sous cette forme :

$$C_i = \vartheta_i \cdot (q_i^s)^2 \quad (4.7)$$

avec ϑ_i est une constante positive qui représente le coût par unité de la taille de cache utilisée. Ainsi, à partir de l'équation 4.5 et de l'équation 4.7, nous pouvons conclure que l'utilité d'un CDN_i est la suivante :

$$U_{CDN_i}(\mathbf{p}, \mathbf{q}^s, \mathbf{p}^c, \mathbf{q}^c) = p_i \cdot D_{CDN_i} + \sum_{j=1}^M f_{ij} \cdot p_j^c \cdot D_{ij} - \vartheta_i \cdot (q_i^s)^2 \quad (4.8)$$

4.2.5 Utilité du Fournisseur CP

Le revenu total de CP_j est $p_j^c \cdot D_{CP_j}(\mathbf{p}, \mathbf{q}^s, \mathbf{p}^c, \mathbf{q}^c)$. Son coût est celui relatif à l'établissement d'une qualité de contenu q_j^c et la part de $CDNs$ qu'il utilise pour la livraison et le stockage de son contenu. l'utilité d'un CP_j est la suivante :

$$U_{CP_j}(\mathbf{p}, \mathbf{q}^s, \mathbf{p}^c, \mathbf{q}^c) = p_j^c \cdot D_{CP_j} - \sum_{i=1}^N f_{ij} \cdot p_j^c \cdot D_{ij} - c_j \cdot (q_j^c)^2 \quad (4.9)$$

avec c_j est une constante positive qui représente le coût par unité de la qualité de contenu établie.

4.3 Formulation de Jeux non Coopératifs

En théorie des jeux, la formulation d'un jeu non coopératif de manière précise nécessite les points suivants :

- Déterminer le nombre d'acteurs impliqués dans le système.
- Définir toutes les actions disponibles pour chaque joueur : il s'agit de spécifier à chaque joueur son propre espace de stratégies.
- Modéliser la fonction objective de chaque joueur qu'il essaie d'optimiser.

Nous formulons deux jeux non coopératifs, le premier (**G1**) étudie les interactions entre les CDN commerciaux et le second (**G2**) ce sera une modélisation de la concurrence entre les CP.

Soit $\mathbf{G1} = [\mathcal{N}, \{P_i, Q_i^s\}, \{U_{CDN_i}(\cdot)\}]$ dénote le jeu non coopératif prix et QoS (JNPQ), où $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ est l'ensemble d'indices identifiant le fournisseur $CDNs$, P_i est l'ensemble de stratégies prix CDN_i , Q_i^s est l'ensemble de stratégies QoS CDN_i et $U_{CDN_i}(\cdot)$ est la fonction utilité. Chaque CDN_i sélectionne un prix $p_i \in P_i$ et une mesure QoS $q_i^s \in Q_i^s$. Soit le vecteur prix $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_N)^T \in P_N = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_N$, le vecteur QoS $\mathbf{q}^s = (q_1^s, \dots, q_N^s)^T \in Q_N^s = Q_1^s \times Q_2^s \times \dots \times Q_N^s$ (où T représente l'opérateur transposé). L'utilité de CDN_i lorsqu'il décide sa stratégie du prix p_i pour allouer la QoS q_i^s est donnée en équation (4.8). Nous supposons que les espaces de stratégies P_i et Q_i^s de chaque CDN sont des ensembles compacts et convexes avec des contraintes maximum et minimum.

Pour n'importe quel CDN_i donné, nous considérons les espaces de stratégies les intervalles fermés $P_i = [p_i, \bar{p}_i]$ et $Q_i^s = [q_i^s, \bar{q}_i^s]$. Afin de maximiser leurs utilités, chaque CDN_i détermine un prix P_i et QoS q_i^s . Formellement, le problème du JPQN peut s'exprimer comme suit :

$$\max_{p_i \in P_i, q_i^s \in Q_i^s} U_{CDN_i}(\mathbf{p}, \mathbf{q}^s), \forall i \in \mathcal{N}$$

Soit $\mathbf{G2} = [\mathcal{M}, \{P_j^c, Q_j^c\}, \{U_{CP_j}(\cdot)\}]$ dénote le jeu non coopératif prix et qualité du contenu (JNPQ), où $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ est l'index identifiant les fournisseurs de contenus CPs, P_j^c est l'ensemble de stratégies de prix pour CP_j , Q_j^c est l'ensemble de stratégies de la qualité du contenu pour CP_j , et $U_{CP_j}(\cdot)$ est la fonction d'utilité. Chaque CP_j choisit son prix $p_j^c \in P_j^c$ et la mesure de la qualité de contenu $q_j^c \in Q_j^c$. Soit le vecteur prix $\mathbf{p}^c = (p_1^c, \dots, p_M^c)^T \in P_N^c = P_1^c \times P_2^c \times \dots \times P_N^c$, le vecteur de la qualité du contenu $\mathbf{q}^c = (q_1^c, \dots, q_M^c)^T \in Q_M^c = Q_1^c \times Q_2^c \times \dots \times Q_N^c$ (où T représente l'opérateur transposé). La fonction d'utilité pour CP_j lorsqu'il décide sa stratégie du prix p_j^c pour garantir une qualité du contenu q_j^c est donnée par l'équation (4.9). Nous supposons que les espaces de stratégies P_j^c et Q_j^c de chaque CP sont des ensembles compacts et convexes avec des contraintes maximum et minimum. Pour n'importe quel CP_j donné, nous considérons les espaces de stratégies comme des intervalles fermés. $P_j^c = [p_j^c, \bar{p}_j^c]$ et $Q_j^c = [q_j^c, \bar{q}_j^c]$. Afin de maximiser leurs utilités, chaque CP_j décide un prix P_j^c et QoS q_j^c . Formellement, le problème NPQG peut s'exprimer comme suit :

$$\max_{p_j^c \in P_j^c, q_j^c \in Q_j^c} U_{CP_j}(\mathbf{p}^c, \mathbf{q}^c), \forall j \in \mathcal{M}$$

4.3.1 Jeu G1 à QoS fixe

Définition 4.1 *Un vecteur prix $\mathbf{p}_j = (p_1^*, \dots, p_{Nj})$ est le prix à l'équilibre de Nash du jeu $G1 = [\mathcal{N}, \{P_i, Q_i^s\}, \{U_{CDN_i}(\cdot)\}]$ si :*

$$\forall (i, p_i) \in (\mathcal{N}, P_i), U_{CDN_i}(p_i^*, \mathbf{p}_{-i}^*) \geq U_{CDN_i}(p_i, \mathbf{p}_{-i}^*)$$

Théorème 4.1 *L'équilibre de Nash de prix pour le jeu $G1 = [\mathcal{N}, \{P_i, Q_i^s\}, \{U_{CDN_i}(\cdot)\}]$ existe et est unique.*

Preuve. 11 *Pour prouver l'existence, nous notons que l'espace de stratégies P_i de chaque CDN est défini par tous les prix dans l'intervalle fermé délimité par les prix minimum et maximum. Ainsi, l'espace de stratégies commun P est un sous-ensemble non vide, convexe et compact de l'espace euclidien \mathbb{R}^N . En outre, les fonctions d'utilité sont concaves en ce*

qui concerne les prix, comme le montre le calcul de la dérivée seconde :

$$\frac{\partial U_{CDN_i}(p_i, \mathbf{p}_{-i})}{\partial p_i} = D_{CDN_i} - Mp_i\alpha_i^i - \sum_{j=1}^M f_{ij}p_j^c\alpha_i^i, \forall i \in \mathcal{N}$$

Ainsi

$$\frac{\partial^2 U_{CDN_i}(p_i, \mathbf{p}_{-i})}{\partial p_i^2} = -2M\alpha_i^i, \forall i \in \mathcal{N}$$

donc

$$\frac{\partial^2 U_{CDN_i}(p_i, \mathbf{p}_{-i})}{\partial p_i^2} < 0, \forall i \in \mathcal{N}$$

ce qui montre l'existence d'un équilibre de Nash pour le jeu de prix.

La méthode la plus courante pour montrer l'unicité est la condition suivante de Rosen [80]. Moulin [67], (voir, par exemple, [61]) : on a

$$\frac{\partial^2 U_{CDN_i}(p_i, \mathbf{p}_{-i})}{\partial p_i^2} = -2M\alpha_i^i, \forall i \in \mathcal{N}$$

et

$$\frac{\partial^2 U_{CDN_i}(p_i, \mathbf{p}_{-i})}{\partial p_i \partial p_n} = M\alpha_i^n, \forall i, n \in \mathcal{N} \text{ et } n \neq i$$

ce qui montre que :

$$\sum_{n, n \neq i} \left| \frac{\partial^2 U_{CDN_i}(p_i, \mathbf{p}_{-i})}{\partial p_i \partial p_n} \right| = M \sum_{n, n \neq i} \alpha_i^n, \forall i, n \in \mathcal{N} \text{ et } n \neq i$$

En utilisant l'hypothèse 4.1, nous concluons que :

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial p_i^2} + \sum_{n, n \neq i} \left| \frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial p_i \partial p_n} \right| < 0.$$

Finalement, l'équilibre de Nash pour le jeu de prix est unique et il est donnée sous la forme suivante :

$$p_i^* \in \underset{p_i \in P_i}{\operatorname{argmax}} U_{CDN_i}(p_i, \mathbf{p}_{-i}), \forall i \in \mathcal{N}$$

4.3.2 Jeu G1 à Prix Fixe

Définition 4.2 Le vecteur QoS $\mathbf{q}^{s*} = (q_1^{s*}, \dots, q_N^{s*})$ est un équilibre de Nash pour le jeu $G1 = [\mathcal{N}, \{P_i, Q_i^s\}, \{U_{CDN_i}(\cdot)\}]$ si :

$$\forall (i, q_i^s) \in (\mathcal{N}, Q_i^s), U_{CDN_i}(q_i^{s*}, \mathbf{q}_{-i}^{s*}) \geq U_{CDN_i}(q_i^s, \mathbf{q}_{-i}^{s*})$$

Théorème 4.2 L'équilibre de Nash de QoS pour le jeu $G1 = [\mathcal{N}, \{P_i, Q_i^s\}, \{U_{CDN_i}(\cdot)\}]$ existe et est unique.

Preuve. 12 Pour prouver l'existence, nous notons que l'espace de stratégie de chaque CDN Q_i^s est défini par tous les prix dans l'intervalle fermé délimité par la QoS minimale et maximale. Ainsi, l'espace de stratégies conjoint Q^s est un sous-ensemble non vide, convexe et compact de l'espace euclidien \mathbb{R}^N . De plus, la fonction d'utilité est concave en ce qui concerne la qualité de service, comme le montre le test sur la dérivée seconde de l'utilité :

$$\frac{\partial U_{CDN_i}(q_i^s, \mathbf{q}_{-i}^s)}{\partial q_i^s} = Mp_i\beta_i^i + \sum_{j=1}^M f_{ij}p_j^c\beta_i^i - 2\vartheta_i q_i^s, \forall i \in \mathcal{N}$$

Ainsi

$$\frac{\partial^2 U_{CDN_i}(q_i^s, \mathbf{q}_{-i}^s)}{\partial (q_i^s)^2} = -2\vartheta_i, \forall i \in \mathcal{N}$$

donc

$$\frac{\partial^2 U_{CDN_i}(q_i^s, \mathbf{q}_{-i}^s)}{\partial (q_i^s)^2} < 0, \forall i \in \mathcal{N}$$

ce qui montre l'existence de l'équilibre de Nash de la QoS.

Afin de prouver le caractère unique de l'équilibre de Nash de la qualité de service et selon [80], dans un jeu concave, l'équilibre de Nash existe si l'espace de stratégies commun est compact et convexe, et la fonction objectif qu'un acteur du système cherche à maximiser est concave dans sa propre stratégie et elle est continue à chaque point de l'espace de stratégies produit. Formellement, si la somme pondérée des utilités fonctionne avec des pondérations non négatives :

$$\psi = \sum_{i=1} x_i U_i, \forall i$$

est strictement concave en diagonale, ce qui implique que le point d'équilibre de Nash est unique. La notion de concavité diagonale stricte signifie qu'un utilisateur individuel a plus de contrôle sur sa fonction d'utilité que d'autres utilisateurs, ce qui est prouvé par l'utilisation du pseudo-gradient de la somme pondérée des fonctions d'utilité. Pour cela, nous définissons la somme pondérée des fonctions d'utilité de l'utilisateur afin de démontrer le caractère unique de l'équilibre de Nash pour la qualité de services, comme

suit :

$$\psi(\mathbf{q}^s, \mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N x_i U_{CDN_i}(q_i^s, \mathbf{q}_{-i}^s), \quad (4.10)$$

Le pseudo-gradient pour l'équation(4.10) est donné par :

$$pg(\mathbf{q}^s, \mathbf{x}) = [x_1 \nabla U_{CDN_1}(q_1^s, \mathbf{q}_{-1}^s), \dots, x_N \nabla U_{CDN_N}(q_N^s, \mathbf{q}_{-N}^s)]^T$$

La matrice jacobienne \mathbf{J}_{pg} du pseudo-gradient (par rapport à \mathbf{q}^s) est écrite par :

$$\mathbf{J}_{pg} = \begin{pmatrix} x_1 \frac{\partial^2 U_{CDN_1}(q_1^s, \mathbf{q}_{-1}^s)}{\partial (q_1^s)^2} & x_1 \frac{\partial^2 U_{CDN_1}(q_1^s, \mathbf{q}_{-1}^s)}{\partial q_1^s \partial q_2^s} & \dots & x_1 \frac{\partial^2 U_{CDN_1}(q_1^s, \mathbf{q}_{-1}^s)}{\partial q_1^s \partial q_N^s} \\ x_2 \frac{\partial^2 U_{CDN_2}(q_2^s, \mathbf{q}_{-2}^s)}{\partial q_2^s \partial q_1^s} & x_2 \frac{\partial^2 U_{CDN_2}(q_2^s, \mathbf{q}_{-2}^s)}{\partial (q_2^s)^2} & \dots & x_2 \frac{\partial^2 U_{CDN_2}(q_2^s, \mathbf{q}_{-2}^s)}{\partial q_2^s \partial q_N^s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_N \frac{\partial^2 U_{CDN_N}(q_N^s, \mathbf{q}_{-N}^s)}{\partial q_N^s \partial q_1^s} & x_N \frac{\partial^2 U_{CDN_N}(q_N^s, \mathbf{q}_{-N}^s)}{\partial q_N^s \partial q_2^s} & \dots & x_N \frac{\partial^2 U_{CDN_N}(q_N^s, \mathbf{q}_{-N}^s)}{\partial (q_N^s)^2} \end{pmatrix}$$

En calculant les différents dérivées, Nous avons :

$$\mathbf{J}_{pg} = \begin{pmatrix} -2x_1 \vartheta_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -2x_2 \vartheta_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -2x_N \vartheta_N \end{pmatrix}$$

A partir de cette matrice, nous pouvons conclure que \mathbf{J}_{pg} est une matrice diagonale avec des éléments diagonaux négatifs. Ce qui implique que la matrice \mathbf{J}_{pg} est définie négative. Désormais $[\mathbf{J}_{pg} + \mathbf{J}_{pg}^T]$ est aussi définie négative, et selon le théorème (6) dans, [80], la somme pondérée des fonctions d'utilité $\psi(\mathbf{q}^s, x)$ est strictement concave en diagonale. Donc le point de l'équilibre de Nash pour le jeu à prix fixe

$$q_i^{s*} \in \underset{q_i^s \in Q_i^s}{\operatorname{argmax}} U_{CDN_i}(q_i^s, \mathbf{q}_{-i}^s), \forall i \in \mathcal{N}$$

est unique.

4.3.3 Le jeu G2 avec QoContent fixe

Définition 4.3 Le vecteur de prix $\mathbf{p}^{c*} = (p_1^{c*}, \dots, p_M^{c*})$ est équilibre de Nash de prix pour le jeu $G2 = [\mathcal{M}, \{P_j^c, Q_j^c\}, \{U_{CP_j}(\cdot)\}]$ si :

$$\forall (j, p_j^c) \in (\mathcal{M}, P_j^c), U_{CP_j}(p_j^{c*}, \mathbf{p}_{-j}^{c*}) \geq U_{CP_j}(p_j^c, \mathbf{p}_{-j}^{c*})$$

Théorème 4.3 L'équilibre de Nash de prix pour le jeu $G2 = [\mathcal{M}, \{P_j^c, Q_j^c\}, \{U_{CP_j}(\cdot)\}]$ existe et est unique.

Preuve. 13 Pour prouver l'existence, nous notons que l'espace de stratégie de chaque CP $P_j^c \in \mathbb{R}^M$ est défini par tous les prix dans l'intervalle fermé délimité par les prix minimum et maximum du contenu et nous procédons de la même manière avec ce que nous avons fait pour démontrer l'existence et l'unicité de l'équilibre des prix pour CDN.

$$\frac{\partial U_{CP_j}(p_j^c, \mathbf{p}_{-j}^c)}{\partial p_j^c} = D_{CP_j} - N\lambda_j^j p_j^c - \sum_{i=1}^N (-f_{ij}\lambda_j^j p_j^c + f_{ij}D_{ij}), \quad \forall j \in \mathcal{M}$$

Ainsi

$$\frac{\partial^2 U_{CP_j}(p_j^c, \mathbf{p}_{-j}^c)}{\partial^2 p_j^c} = -2N\lambda_j^j + 2\lambda_j^j \sum_{i=1}^N f_{ij}, \quad \forall j \in \mathcal{M}$$

Donc

$$\frac{\partial^2 U_{CP_j}(p_j^c, \mathbf{p}_{-j}^c)}{\partial^2 p_j^c} < 0, \quad \forall j \in \mathcal{M} \quad (4.11)$$

ce qui implique l'existence de l'équilibre de Nash de prix pour le jeu G_2 .

De même, nous avons

$$\frac{\partial^2 U_{CP_j}(p_j^c, \mathbf{p}_{-j}^c)}{\partial^2 p_j^c} = -2N\lambda_j^j + 2\lambda_j^j \sum_{i=1}^N f_{ij}, \quad \forall j \in \mathcal{M}$$

et

$$\frac{\partial^2 U_{CP_j}(p_j^c, \mathbf{p}_{-j}^c)}{\partial p_j^c \partial p_m^c} = N\lambda_j^m - \lambda_j^m \sum_{i=1}^N f_{ij} > 0, \quad \forall j, m \in \mathcal{M} \text{ et } m \neq j$$

ce montre que :

$$\sum_{m, m \neq j} \left| \frac{\partial^2 U_{CP_j}(p_j^c, \mathbf{p}_{-j}^c)}{\partial p_j^c \partial p_m^c} \right| = N \sum_{m, m \neq j} \lambda_j^m - \sum_{m, m \neq j} \sum_{i=1}^N \lambda_j^m f_{ij}, \quad \forall j, m \in \mathcal{M} \text{ et } m \neq j$$

hence

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_{CP_j}(p_j^c, \mathbf{p}_{-j}^c)}{\partial^2 p_j^c} + \sum_{m, m \neq j} \left| \frac{\partial^2 U_{CP_j}(p_j^c, \mathbf{p}_{-j}^c)}{\partial p_j^c \partial p_m^c} \right| &= -2N\lambda_j^j + 2\lambda_j^j \sum_{i=1}^N f_{ij} + N \sum_{m, m \neq j} \lambda_j^m \\ &\quad - \sum_{m, m \neq j} \sum_{i=1}^N \lambda_j^m f_{ij}, \quad \forall j, m \in \mathcal{M} \text{ et } m \neq j \end{aligned}$$

En tenant compte de l'hypothèse 4.2, nous avons :

$$\sum_{i=1}^N f_{ij} < 1 < N, \quad \forall j \in \mathcal{M}$$

donc

$$\sum_{m,m \neq j} \sum_{i=1}^N \lambda_j^m f_{ij} < N \sum_{m,m \neq j} \lambda_j^m, \quad \forall j \in \mathcal{M}$$

$$\frac{\partial^2 U_{CP_j}(p_j^c, \mathbf{p}_{-j}^c)}{\partial^2 p_j^c} + \sum_{m,m \neq j} \left| \frac{\partial^2 U_{CP_j}(p_j^c, \mathbf{p}_{-j}^c)}{\partial p_j^c \partial p_m^c} \right| < -2N\lambda_j^j + 2\lambda_j^j \sum_{i=1}^N f_{ij}, \quad \forall j \in \mathcal{M}$$

D'après ce que nous avons déjà montré dans l'équation (4.11), nous avons :

$$\frac{\partial^2 U_{CP_j}(p_j^c, \mathbf{p}_{-j}^c)}{\partial^2 p_j^c} + \sum_{n,n \neq i} \left| \frac{\partial^2 U_{CP_j}(p_j^c, \mathbf{p}_{-j}^c)}{\partial p_j^c \partial p_m^c} \right| < 0.$$

Enfin, l'équilibre de Nash de prix est unique et est donné par :

$$p_j^{c*} \in \operatorname{argmax}_{p_j^c \in P_j^c} U_{CP_j}(p_j^c, \mathbf{p}_{-j}^c), \quad \forall j \in \mathcal{M}$$

4.3.4 Le Jeu G2 avec Prix Fixe

Définition 4.4 Un vecteur de qualité de contenu (QoContent) $\mathbf{q}^* = (q_1^{c*}, \dots, q_M^{c*})$ est un équilibre de Nash en fixant le prix pour le jeu $G2 = [\mathcal{M}, \{P_j^c, Q_j^c\}, \{U_{CP_j}(\cdot)\}]$ si :

$$\forall (j, q_j^c) \in (\mathcal{M}, Q_j^c), U_{CP_j}(q_j^{c*}, \mathbf{q}_{-j}^{c*}) \geq U_{CP_j}(q_j^c, \mathbf{q}_{-j}^{c*})$$

Théorème 4.4 L'équilibre de Nash avec prix fixe pour le jeu $G2 = [\mathcal{N}, \{P_j^c, Q_j^c\}, \{U_{CP_j}(\cdot)\}]$ existe et est unique.

Preuve. 14 Pour prouver l'existence, nous notons que l'espace des stratégies de chaque CP $Q_j^c \in \mathbb{R}^M$ est défini par la qualité de tous les contenus dans l'intervalle fermé délimité par les QoContents minimum et maximum et nous procédons de la même manière avec ce que nous avons fait pour démontrer l'existence et le caractère unique de l'équilibre QoS de CDN dans la section précédente.

$$\frac{\partial U_{CP_j}(q_j^c, \mathbf{q}_{-j}^c)}{\partial q_j^c} = N p_j^c \gamma_j^j - \sum_{i=1}^N f_{ij} p_j^c \gamma_j^j - 2c_j q_j^c, \quad \forall j \in \mathcal{M}$$

Ainsi,

$$\frac{\partial^2 U_{CP_j}(q_j^c, \mathbf{q}_{-j}^c)}{\partial^2 q_j^c} = -2c_j, \quad \forall j \in \mathcal{M}$$

Donc

$$\frac{\partial^2 U_{CP_j}(q_j^c, \mathbf{q}_{-j}^c)}{\partial^2 q_j^c} < 0, \forall j \in \mathcal{M}$$

Ce qui montre l'existence de l'équilibre de Nash pour le jeu G2 avec prix fixe. Nous définissons la somme pondérée des fonctions d'utilités des joueurs pour démontrer le caractère unique de l'équilibre de Nash du jeu avec prix fixe, comme suit :

$$\psi(\mathbf{q}^c, \mathbf{y}) = \sum_{j=1}^M y_j U_{CP_j}(q_j^c, \mathbf{q}_{-j}^c), \quad (4.12)$$

Le pseudo-gradient (4.12) est donnée par :

$$pg(\mathbf{q}^c, \mathbf{y}) = [y_1 \nabla U_{CP_1}(q_1^c, \mathbf{q}_{-1}^c), \dots, y_M \nabla U_{CP_M}(q_M^c, \mathbf{q}_{-M}^c)]^T$$

La matrice jacobienne \mathbf{J}_{pg} du pseudo-gradient (par rapport \mathbf{q}^c) est donnée comme suit :

$$\mathbf{J}_{pg} = \begin{pmatrix} -2y_1 c_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -2y_2 c_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -2y_M c_M \end{pmatrix}$$

Les éléments de la diagonale de la matrice \mathbf{J}_{pg} sont négatifs. Ce qui montre que \mathbf{J}_{pg} est une matrice définie négative. Ainsi la matrice résultante de $[\mathbf{J}_{pg} + \mathbf{J}_{pg}^T]$ est aussi une matrice définie négative, et selon le théorème (6) dans le papier, [80], la somme pondérée des fonctions d'utilité $\psi(\mathbf{q}^c, \mathbf{y})$ est strictement concave en diagonale. Ainsi, l'équilibre Nash pour les prix fixes du jeu G2

$$q_j^{c*} \in \underset{q_j^c \in Q_j^c}{\operatorname{argmax}} U_{CP_j}(q_j^c, \mathbf{q}_{-j}^c), \forall j \in \mathcal{M}$$

est unique.

4.4 Apprentissage de l'Équilibre de Nash

4.4.1 La Meilleure Réponse Dynamique

La meilleure réponse d'un joueur est définie comme sa stratégie optimale qui fait de lui un gain optimal compte tenu des stratégies des adversaires. La meilleure réponse dynamique d'un joueur, comme son nom l'indique, est d'adapter sa stratégie aux stratégies récentes des autres et sans tenir compte de l'effet des stratégies actuelles de tous les joueurs sur le futur jeu dans le jeu .

Algorithm 3 Algorithme de la Meilleure Réponse Dynamique

-
- 1: **Initialisation** des vecteurs $\mathbf{a} = [a_1, \dots, a_n]$: espace de stratégies.
 - 2: **Tant que** il existe i tel que $a_i \notin \operatorname{argmax}_{a \in A_i} (U_i(a, \mathbf{a}_{-i}))$
 Set $a_i = \operatorname{argmax}_{a \in A_i} (U_i(a, \mathbf{a}_{-i}))$.
 - Fin Tant que**
 - 3: **Arrêter** et retourner \mathbf{a} .
-

Où \mathbf{a} désigne le vecteur \mathbf{p} , \mathbf{q}^s , \mathbf{p}^c et \mathbf{q}^c . A_i indique les stratégies de prix P_i , de la QoS Q_i^s , le prix du contenu P_i^C et de la qualité du contenu Q_i^c .

4.4.2 Prix de l'Anarchie

Le concept de prix de l'anarchie est une mesure que Koutsoupias et Papadimitriou [46] ont proposée pour savoir l'inefficacité de l'équilibre de Nash causé par le comportement égoïste des acteurs du système. Cette mesure est définie comme le rapport le plus défavorable entre le coût d'un équilibre de Nash et le coût d'un système optimal. Ce dernier est défini comme le maximum de la somme des utilitaires de tous les acteurs des systèmes :

$$POA = \frac{\min_{a_i, \mathbf{a}_{-i}} W_{NE}(a_i, \mathbf{a}_{-i})}{\max_{a_i, \mathbf{a}_{-i}} W(a_i, \mathbf{a}_{-i})} \quad (4.13)$$

avec $W(a_i, \mathbf{a}_{-i}) = \sum_{i=1}^N U_i(a_i, \mathbf{a}_{-i})$ est une fonction du bien-être et $W_{NE}(a_i, \mathbf{a}_{-i}) = \sum_{i=1}^N U_i(a_i^*, \mathbf{a}_{-i})$ est une somme des utilités de tous les acteurs à l'équilibre de Nash.

4.5 Résultats Numériques

Dans cette section, nous présentons une étude numérique des jeux prenant en compte les expressions précédentes des utilités. À titre d'illustration, nous considérons deux fournisseurs de contenu *CPs* et deux fournisseurs de *CDNs*.

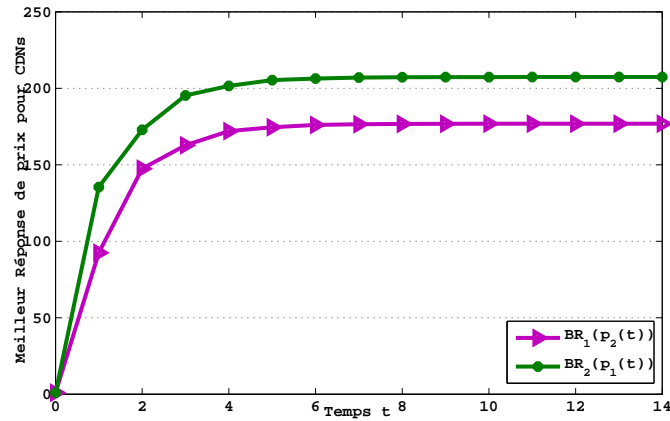


FIGURE 4.2 – Convergence vers l'Equilibre de Nash des Prix pour le Jeu G1

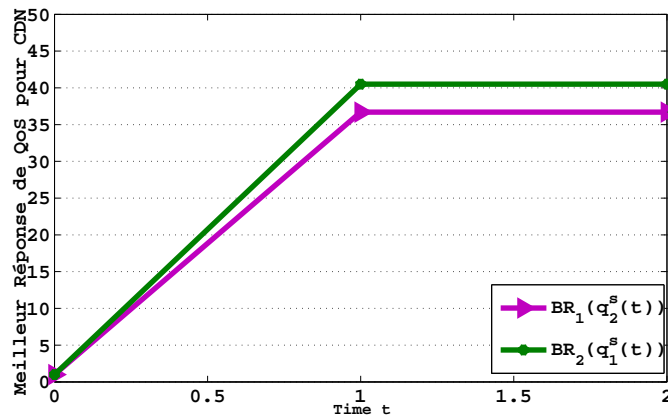


FIGURE 4.3 – Convergence vers l'Equilibre de Nash des QoS pour le Jeu G1

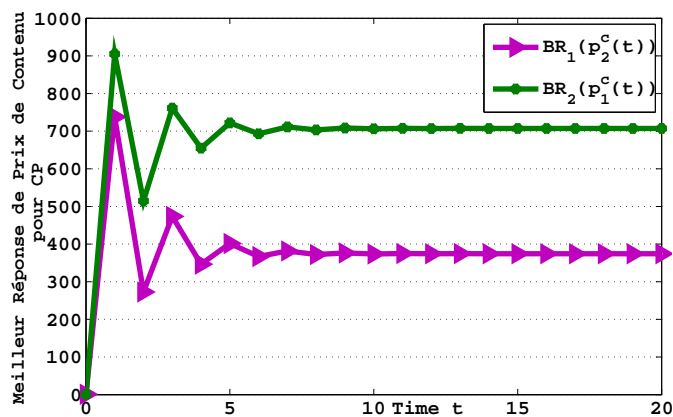


FIGURE 4.4 – Convergence vers l'Equilibre de Nash des Prix de Contenu pour le Jeu G2

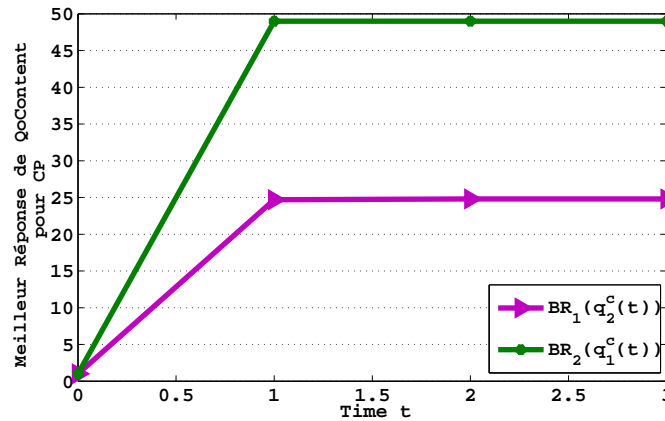


FIGURE 4.5 – Convergence vers l'Equilibre de Nash des Qualité de Contenu pour le Jeu G2

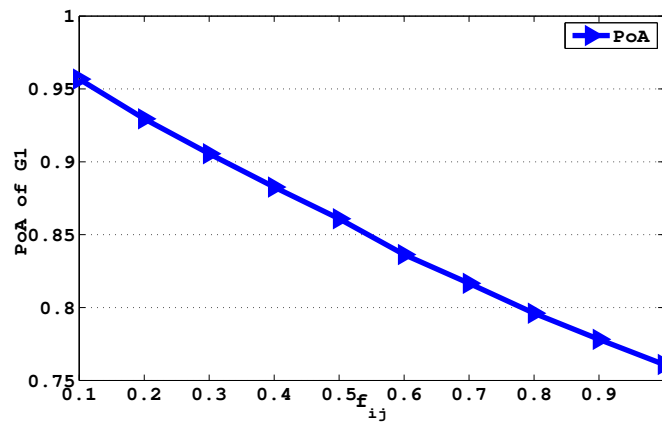


FIGURE 4.6 – Le Prix de l'Anarchie en Fonction de f_{ij} dans le Jeu G1.

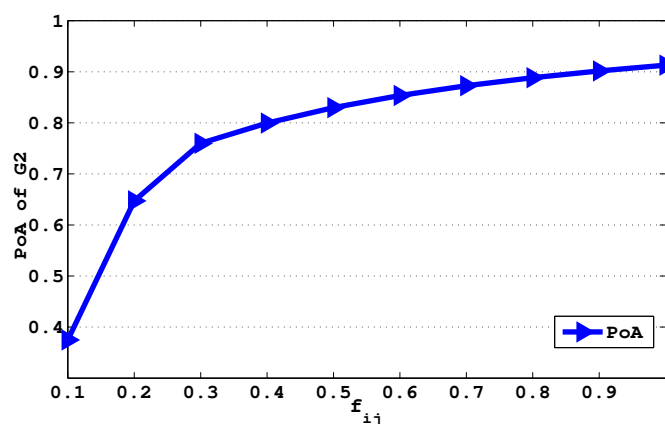


FIGURE 4.7 – Le Prix de l'Anarchie en Fonction de f_{ij} dans le Jeu G2.

Les figures 4.2, 4.3, 4.4 et 4.5 représentent respectivement la convergence vers l'équilibre de Nash pour le prix, la qualité de service de *CDNs*, le prix et la qualité du contenu de *CPs*. La convergence vers un équilibre de Nash est une situation dans laquelle tous les

acteurs ont une satisfaction et chacun ne peut prendre une telle décision tout seul sans prendre en considération ce qui se passe chez ses adversaires. Cela renforce ce que nous avons trouvé dans l'étude théorique présentée dans les sections précédentes. En utilisant le concept du prix de l'anarchie qui est une mesure pour donner des informations sur l'efficacité de l'équilibre de Nash, la figure 4.6 représente l'évolution du prix de l'anarchie en fonction du paramètre f_{ij} dans le jeu $G1$; nous remarquons que lorsque les fournisseurs de $CDNs$ prennent des valeurs plus petites pour f_{ij} , le prix de l'anarchie tend à 1, ce qui montre que les $CDNs$ ne sont pas égoïstes et chacun cherche à obtenir un profit optimal en fonction de la situation de le système (stratégies des autres) pour converger vers un équilibre de Nash où tout le monde est satisfait en termes de gain. Tandis que, pour les choix plus élevés de valeurs de f_{ij} , les $CDNs$ deviennent égoïstes et chacun essaie de maximiser son profit sans tenir compte des stratégies des adversaires. Il est confondu avec la réalité vue lorsque f_{ij} tend à 1, ce qui signifie que le CP peut prendre des décisions de ne pas utiliser les $CDNs$ pour la distribution de son contenu. Ce qui conduit le fournisseur de contenus à chercher d'autres solutions pour faire la livraison de son contenu. Par conséquent, le jeu des CDN converge vers une situation de monopole où tout le monde essaie de convaincre le CP en utilisant d'autres stratégies motivantes. A l'inverse, la figure 4.7 représente la courbe du prix de l'anarchie dans le jeu $G2$, on voit que lorsque f_{ij} tend à 0, le jeu entre le CPs devient monopole et inversement lorsque f_{ij} augmente, le jeu converge vers le point qui le rend socialement optimal.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé et analysé les interactions pouvant exister entre les principaux acteurs de la chaîne de distribution du contenu Internet. Cette étude de cet écosystème nous a amené à concevoir deux jeux non coopératifs, l'un entre les fournisseurs de contenu et l'autre entre les fournisseurs de réseau de distribution de contenu Internet. Après avoir démontré l'existence et l'unicité de l'équilibre de Nash pour les deux jeux, nous avons utilisé l'algorithme de la meilleure réponse dynamique pour apprendre l'équilibre de Nash. Nous avons donc montré numériquement la convergence vers ce point d'équilibre. Nous avons conclu que la décision sur un paramètre commun tel que f_{ij} si il est dominé par l'un des acteur, le jeu converge vers une situation de monopole dans laquelle tout le monde essaie de maximiser ses profits sans tenir compte des stratégies décisionnelles de ses adversaires. Les outils de négociation constitueront donc l'une des solutions permettant de lutter contre un tel comportement de dominance de la décision de la part d'un des acteurs par rapport aux autres acteurs des réseaux de télécommunication.

Dans les travaux futurs, nous proposons également d'étudier ce système avec une topologie plus complexe en introduisant d'autres acteurs (utilisateurs, opérateurs de téléphonie mobile, ...) dans notre étude. Nous pensons donc intégrer la notion de rationalité limitée [7] pour savoir quelle est son implication pour le système étudié.

Analyse des Décisions des Drones

5.1 Introduction

L'utilisation de drones (UAV) devient de plus en plus nécessaire dans notre vie quotidienne. Elles sont appliquées dans de nombreuses industries et services publics [65], comme la gestion des catastrophes, la gestion du trafic et la surveillance [64]. Les drones sont capables de réaliser des services Internet des Objets en intégrant des caméras, capteurs, dispositifs de communication, etc [63]. Les drones offrent en général un déploiement à moindre coût, une grande maniabilité, une reconfiguration flexible et une approche des utilisateurs au sol, ce qui conduit à une diminution des puissances de transmission et à une agrégation de données efficace en énergie. Plus précisément, lorsque les drones seront apparus dans les réseaux de communication sans fil, les utilisateurs bénéficieront de meilleurs services de communication en raison du fait que les réseaux cellulaires traditionnels présentent plusieurs lacunes [100], comme une charge de communication de plus en plus insupportable résultant de l'augmentation des dispositifs intelligents. L'intérêt pour les chercheurs et les industriels d'investir sur une telle technologie est d'élargir leur champ d'utilisation dans de nombreux domaines.

Dans un environnement concurrentiel, l'outil de la théorie des jeux non coopératifs reste l'outil le plus efficace pour trouver le gain optimal d'un tel agent dans le système. Cet outil propose de suivre une méthodologie mathématique pour modéliser et analyser les interactions entre les différents agents rationnels et intelligents du système. Cette branche permet à des individus intelligents d'interagir les uns avec les autres afin que chacun puisse optimiser son propre gain. Le comportement des agents est égoïste et chaque joueur prend des décisions indépendamment des autres sans former de coalitions. Plusieurs travaux utilisent le jeu non coopératif dans l'étude des réseaux de communications [7, 3, 33, 32, 5, 6]. Les propriétés de la théorie des jeux ont été utilisées pour résoudre divers types de défis dans les communications sans fil avec les drones, comme l'optimisation de la puissance, l'optimisation de l'énergie, la recherche de la hauteur et de la couverture optimales, la répartition des tâches et les problèmes liés à l'efficacité des performances réseaux.

Les auteurs de [35] proposent un cadre de planification proactive pour gérer une flotte

de véhicules aériens télépilotés (UAV). Ils ont proposé un cadre de remise des drones qui serait formulé de façon générique et applicable dans plusieurs domaines qui ont l'intendance nécessaire pour assurer un service ininterrompu. L'auteur dans [101] propose une architecture de réseau de drones en couches et le nombre minimum de drones de couche supérieure qui est théoriquement prouvé par des limites de couverture réseau. Les auteurs de [73] proposent un algorithme pour le positionnement conjoint des stations de base volantes et l'association des utilisateurs pour maximiser le taux de satisfaction. L'algorithme développé est présenté en deux variantes : l'une basée sur l'algorithme génétique et l'autre sur l'optimisation de la distribution de particules. Les auteurs de [21] ont développé un cadre d'un modèle distribué de contrôle prédictif pour le contrôle de la formation des UAV dans lequel chaque UAV ne partage que des informations avec les voisins. Les auteurs de [28] ont proposé une formulation de jeu stochastique pour le problème d'allocation dynamique des ressources des réseaux de drones considérés. En outre, les auteurs ont étudié une conception en temps réel de l'allocation des ressources pour les réseaux de liaison descendante à drones multiples afin de maximiser les avantages à long terme. Les auteurs de [45] ont proposé l'utilisation la période de balisage pour les UAV servant de stations de base aérienne dans un système de communication sans fil. Les auteurs ont modélisé l'ordonnancement des périodes-balisés à l'aide d'un ensemble sous-modulaire non coopératif. Dans ce jeu, les drones sont considérés comme des joueurs qui cherchent à maximiser la probabilité de couverture mobile dans la zone d'intérêt. Les auteurs de [62] ont proposé une approche fondée sur la théorie des jeux coopératif pour l'optimisation de l'efficacité énergétique dans les réseaux assistés par UAV. Ils utilisent la solution de jeux de négociation, qui offre une durée de signalisation optimale pour minimiser la consommation d'énergie. Dans [41] les auteurs ont étudié un modèle de duopole basé sur le jeu non coopératif pour capturer le comportement contradictoire des drones agissant comme stations de base volantes en ce qui concerne leurs politiques tarifaires et leurs probabilités respectives de disponibilité. Les drones ont des capacités limitées et sont alimentés par des batteries, ce qui nécessite qu'ils soient rechargés. Pour cette raison, les auteurs ont proposé un marquage périodique optimal qui doit tenir compte d'une telle contrainte.

Comme le drone a un grand potentiel pour accélérer le développement de la communication sans fil, il a attiré l'attention du monde universitaire et de l'industrie au cours des dernières années. Bien que d'énormes études sur les UAVs aient été rapportées dans le milieu de la recherche, la plupart d'entre elles ne portent que sur des questions techniques liées aux UAV, peu de travaux ont été fait en ce qui concerne l'application des UAVs du point de vue technoeconomique. Étant donné le fait que les fournisseurs de services Internet (ISP) émergent UAVs pour offrir des services aux utilisateurs. La question c'est

comment ils font leur stratégie dans le cas où ils utilisent les drones pour assurer leurs services ?

Dans ce chapitre, nous étudions l'interaction entre les FAI qui introduisent les UAV, chaque UAV servant de stations de base volantes et servant un certain nombre d'utilisateurs finaux. Nous modélisons notre problème dans le cadre théorique basé sur des jeux non coopératifs et définissons l'espace de stratégies de chaque drone, en termes de prix, de qualité de service, et de la période de balisage. Nous prouvons formellement l'existence et le caractère unique de l'équilibre de Nash (NE) du modèle et, à partir de ces preuves, proposons un algorithme itératif pour calculer le NE. De plus, la convergence de l'algorithme proposé est explorée. Nous effectuons une analyse numérique approfondie pour déterminer les facteurs qui affecteront la part de marché et les stratégies des FAI avec UAV. Plusieurs informations utiles sur les stratégies des fournisseurs d'accès Internet sont tirées de cette étude. Nous éclairerons dans cet étude l'importance d'utiliser les UAV comme station de base pour les fournisseurs d'accès à Internet.

Ce chapitre est organisé comme suit : Dans la section 5.2, nous présentons la formulation du problème. Nous présentons la formulation du problème en modélisant le comportement des utilisateurs au sol, la probabilité de service et nous décrivons le modèle d'utilité des drones. Ensuite, nous présentons l'analyse théorique du jeu non coopératif considéré dans cette étude et l'algorithme utilisé pour apprendre le point d'équilibre de Nash dans la section 5.3. Les résultats de la simulation sont présentés à la section 5.4, suivis d'une conclusion à la section 5.5.

5.2 Formulation du Problème

Nous étudions un réseau où les drones sont en compétition pour les utilisateurs au sol. Chaque UAV j choisit sa durée de balisage ξ_j dans l'intervalle $[0, T]$, un prix de service p_j et une qualité de service q_{s_j} .

5.2.1 Probabilité de Service

Chaque drone envoie une balise aux utilisateurs au sol pour annoncer sa présence pendant une période fixe de durée ξ . Les drones choisissent leurs durées de balisage pour maximiser la probabilité de rencontrer un appareil mobile au sol. Le cycle de la balise est répété périodiquement pour chaque intervalle de temps T sur une fenêtre temporelle : $m = L \times T$ (L : nombre de période $[0, T]$ dans la fenêtre m) comme illustré dans la figure 5.1. Les drones devraient fixer leurs périodes de balisage pour maximiser leur taux de rencontre avec les utilisateurs au sol. Toutefois, ils devraient éviter l'épuisement de

la batterie résultant du maintien d'un balisage inutile en l'absence de contact avec les utilisateurs au sol. La première rencontre suit une distribution exponentielle avec un paramètre aléatoire λ . Chaque UAV j rencontre des utilisateurs au sol à l'heure ξ , si les conditions suivantes sont remplies :

- Le drone doit être situé (beaconing) pendant une durée ξ .
- Les rencontres doivent avoir lieu tant que l'adversaire de l'UAV j est inactif. En d'autres termes, toutes les rencontres avec d'autres UAV se produisent avant que le temps instantané ξ_j doit être échoué.

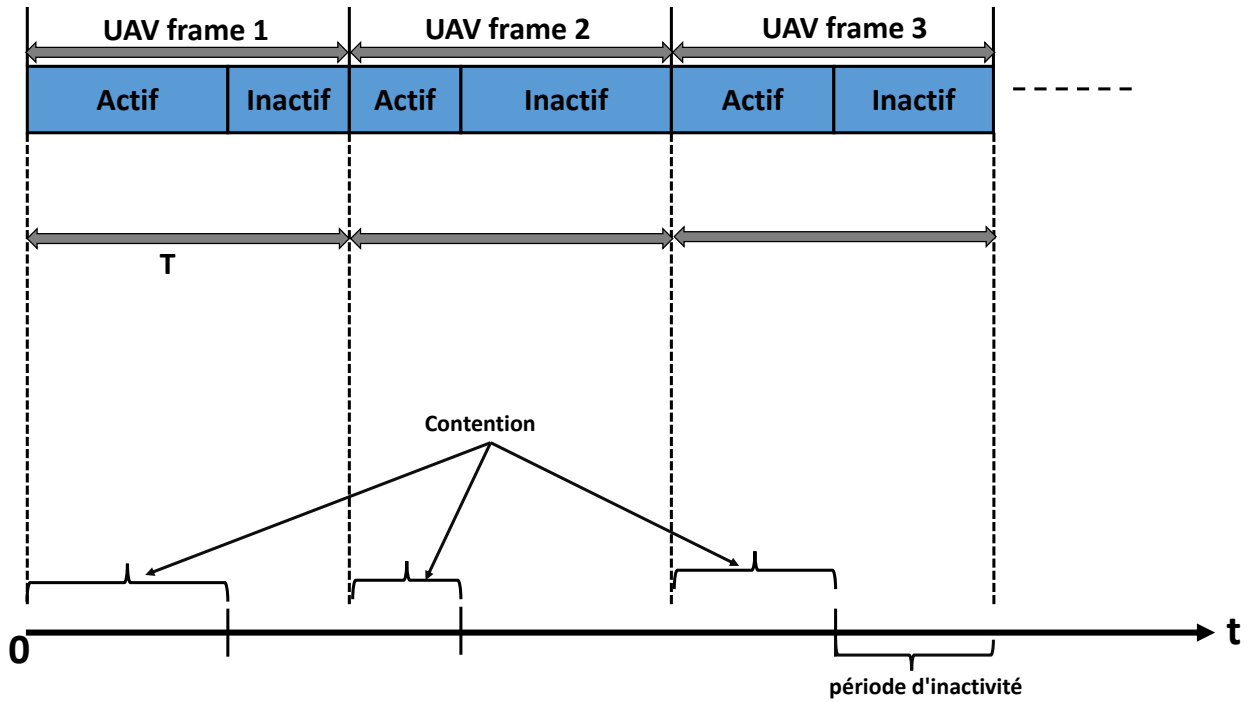


FIGURE 5.1 – Calendrier du Cycle de Balisage.

Par conséquent, la probabilité pour qu'un contact réussisse peut être exprimée par [41] :

$$P_j^{srv} = \sum_{n=1}^M \left[P(T_j \leq T_n) + P(T_j \geq T_n) p_n^{slp} \right] P_j^{bcn} \quad (5.1)$$

P_j^{bcn} est la probabilité de repérage pendant que UAV_j rencontre pour la première fois la destination dans l'intervalle $[0, m]$

$$P_j^{bcn} = \sum_{s=0}^{l-1} \left(\int_{sT}^{sT+\xi_j} \lambda_j e^{-\lambda_j x} dx \right) \quad (5.2)$$

$$= - \frac{e^{-\lambda T} (e^{-m\lambda_j} - e^{-\lambda_j(m+\xi_j)} - 1 + e^{-\lambda_j \xi_j})}{e^{\lambda_j T} - 1}$$

P_j^{slp} est la probabilité que l'UAV j soit inactif :

$$\begin{aligned} P_j^{slp} &= \sum_{s=0}^{l-1} \left(\int_{sT+\xi_j}^{(s+1)T} \lambda_j e^{-\lambda_j x} dx \right) \\ &= \frac{e^{-\lambda_j T} (-e^{-\lambda_j(m+\xi_j)} + e^{-\lambda_j(m+T)} + e^{-\lambda_j \xi_j} - e^{-\lambda_j T})}{e^{\lambda_j T} - 1} \end{aligned} \quad (5.3)$$

La probabilité que l'UAV $_j$ et l'UAV $_i$ rencontrent d'abord les utilisateurs au sol sans rendre compte de leur état s'exprime comme suit :

$$P(T_j \leq T_n) = \frac{\lambda_n e^{-m(\lambda_n + \lambda_j)} + (-\lambda_n - \lambda_j) e^{-\lambda_n m} + \lambda_j}{\lambda_j + \lambda_n} \quad (5.4)$$

$$P(T_j \geq T_n) = \frac{\lambda_j e^{-m(\lambda_n + \lambda_j)} + (-\lambda_n - \lambda_j) e^{-\lambda_j m} + \lambda_n}{\lambda_j + \lambda_n} \quad (5.5)$$

5.2.2 Modélisation de la Demande

Les frais de services, la durée du repérage (beaconing) et la qualité de service influent sur les demandes des utilisateurs. La fonction de demande linéaire est [3] :

$$\begin{aligned} D_j(p, \xi, q_s) &= d_j - \rho_j^j p_j + \delta_j^j \xi_j + \sigma_j^j q_j \\ &\quad + \sum_{n=1, n \neq j}^M (\rho_j^n p_n - \delta_j^n \xi_n - \sigma_j^n q_n) \end{aligned} \quad (5.6)$$

Le paramètre d_i exprime la demande potentielle des utilisateurs du sol. ρ_j^n , δ_j^n et σ_j^n ce sont des paramètres positifs représentant respectivement la sensibilité de l'ISP $_j$ au prix p_n , période de balisage (beaconing) ξ_n et la qualité de services q_{s_n} . Pour ISP $_j$, la demande D_j diminue par rapport au prix qu'elle facture, p_j , et augmente par rapport aux prix des adversaires, p_n . La même chose pour la QoS et la durée du balisage, D_j augmente selon q_{s_j} (resp. ξ_j) et diminue selon q_{s_n} (resp. ξ_n).

Hypothèse 5.1 La sensibilité ρ vérifie la condition suivante :

$$\rho_j^j \geq \rho_j^n, \quad j \neq n.$$

La sensibilité δ vérifie la condition suivante :

$$\delta_j^j \geq \delta_j^n, \quad j \neq n.$$

L'hypothèse 5.1 sera nécessaire pour assurer le caractère unique de l'équilibre de Nash. L'hypothèse 5.1 signifie que l'influence des frais de service (ou de la durée du balisage) de l'UAV sur sa demande est supérieure à l'influence des prix de son adversaire sur sa demande.

5.2.3 Fonction d'Utilité

La fonction d'utilité U_j de l'UAV j peut être modélisé sous cette forme :

$$U_j = D_j p_j P_j^{srv}(\xi) - \frac{(C_{b_j} \xi + C_{s_j})l}{m} - \vartheta_j B_j \quad (5.7)$$

où $m = l \times T$ est la fenêtre temporelle disponible pour que les UAV soient en contact avec les utilisateurs au sol. C_{b_j} est les frais sur l'énergie pour l'envoi de balises et C_{s_j} est l'énergie consommée lors du processus de changement d'état de l'émetteur-récepteur. $D_j p_j P_j^{srv}(\xi)$ est le revenu de l'UAV j en servant la demande $D_j P_j^{srv}(\xi)$. $\vartheta_j B_j$ est un frais payé par l'UAV j , où ϑ_j est un coût par unité de la bande passante de backhaul, B_j est la largeur de bande de backhaul requise par le drone j . Nous supposons que la qualité de service correspond au délai attendu (see ([11])).

$$B_j = P_j^{srv} D_j + q_{s_j}^2 \quad (5.8)$$

Par conséquent, en remplaçant 5.8 dans 5.7, l'utilité de l'UAV j peut être écrite comme,

$$U_j = D_j p_j P_j^{srv}(\xi) - \frac{(C_{b_j} \xi + C_{s_j})l}{m} - \vartheta_j (P_j^{srv} D_j + q_{s_j}^2) \quad (5.9)$$

5.3 Formulation et Analyse du Jeu non Coopératif

Mettons $G = [K, \{P_j, Q_{s_j}, \Xi_j\}, \{U_i(\cdot)\}]$ denote le jeu non-coopératif de prix, QoS et la période de balisage (NPQBG), où $K = \{1, \dots, M\}$ est l'index de l'ensemble identifiant l'UAVs. P_j est l'ensemble des stratégies de prix des services de UAV $_j$, Q_{s_j} est l'ensemble de stratégie QoS de UAV $_j$ et Ξ_j iest l'ensemble de stratégie de balisage de UAV $_j$ $U_j(\cdot)$ est la fonction d'utilité de l' UAV $_j$ et qui est définie dans l'équation 5.9. Nous considérons donc les espaces de stratégies comme $P_j = [\underline{p}_j, \overline{p}_j]$, $Q_{s_j} = [\underline{q}_{s_j}, \overline{q}_{s_j}]$ et $\Xi_j = [\underline{\xi}_j, \overline{\xi}_j]$ qui sont des ensembles compacts et convexes définis en termes de prix minimal et maximal, de qualité de service et de balisage (beaconing).

Mettons lme vecteur de prix $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_M)^T \in P_t = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_M$, le vecteur QoS $\mathbf{q}_s = (q_{s_1}, \dots, q_{s_M})^T \in Q_s = Q_{s_1} \times Q_{s_2} \times \dots \times Q_{s_M}$, le vecteur de la période de balisage

$\xi_c = (\xi_1, \dots, \xi_M)^T \in \Xi = \Xi_1 \times \Xi_2 \times \dots \times \Xi_M$ (où T représente l'opérateur de transposition)

Le problème du jeu NPQBG peut être exprimé comme :

$$\max_{p_j \in P_j, \mathbf{q}_{s_j} \in Q_{s_j}, \xi_j \in \Xi_j} U_j(\mathbf{p}_s, \mathbf{q}_s, \xi), \quad \forall j \in K. \quad (5.10)$$

5.3.1 Jeu de Prix

Le jeu de prix p est défini pour $\mathbf{q}_s \in Q_s$ et $\xi \in \Xi$ fixés comme $G_1(\mathbf{q}_s, \xi) = [K, \{P_j\}, \{U_j(\cdot, \mathbf{q}_s, \xi)\}]$.

Définition 5.1 *Le vecteur de prix $\mathbf{p}^* = (p_1^*, \dots, p_M^*)$ est un équilibre de Nash pour le jeu de prix $G_1(\mathbf{q}_s, \xi)$ si :*

$$\forall (j, p_j) \in (K, P_j), \quad U_j(p_j^*, \mathbf{p}_{-j}^*, \mathbf{q}_s, \xi) \geq U_j(p_j, \mathbf{p}_{-j}^*, \mathbf{q}_s, \xi)$$

Théorème 5.1 *Pour chaque $\mathbf{q}_s \in Q_s$, $\xi \in \Xi$, le jeux $[K, \{P_j\}, \{U_j(\cdot, \mathbf{q}_s, \xi)\}]$ admet un équilibre unique.*

Preuve. 15 *L'espace de stratégies commun P_j est un sous-ensemble non vide, convexe et compact de l'espace euclidien R^N . De plus, La dérivée de second ordre de l'utilité en ce qui concerne les prix est négative comme suit :*

$$\frac{\partial^2 U_j}{\partial p_j^2} = -2\rho_j^j P_j^{srv} \leq 0 \quad (5.11)$$

La deuxième dérivée de l'utilité par rapport au prix est négative, ce qui garantit l'existence d'un point d'équilibre de Nash.

Le jeu $G(\mathbf{q}_s, \xi)$ admet un point d'équilibre de Nash unique, si la condition de solvabilité de la dominance [47] est satisfait :

$$-\frac{\partial^2 U_j}{\partial p_j^2} \geq \sum_{n=1, n \neq j}^M \left| \frac{\partial^2 U_j}{\partial p_j \partial p_n} \right| \quad (5.12)$$

Le partiel mixte est écrit comme :

$$\frac{\partial^2 U_j}{\partial p_j \partial p_n} = \rho_j^n P_j^{srv} \quad (5.13)$$

donc,

$$-\frac{\partial^2 U_j}{\partial p_j^2} - \sum_{n=1, n \neq j}^M \left| \frac{\partial^2 U_j}{\partial p_j \partial p_n} \right| = P_j^{srv}(\rho_j^j - \sum_{n=1, n \neq j}^M \rho_j^n) \geq 0 \quad (5.14)$$

Ainsi, le jeu $G(\mathbf{q}_s, \xi)$ admet un point unique de l'équilibre de Nash.

5.3.2 Le jeu de Balisage

Le jeu de balisage (beaconing) ξ est défini pour $\mathbf{q}_s \in Q_s$ et $\mathbf{p} \in P_t$ fixés comme $G(\mathbf{p}, \mathbf{q}_s) = [K, \{\xi_j\}, \{U_j(\mathbf{p}, \mathbf{q}_s, \cdot)\}]$.

Définition 5.2 *Le vecteur de balisage (beaconing) $\xi^* = (\xi_1^*, \dots, \xi_M^*)$ est un équilibre de Nash pour le jeu $G(\mathbf{p}, \mathbf{q}_s)$ si :*

$$\forall (j, \xi_j) \in (K, \Xi_j), \quad U_j(\mathbf{p}, \mathbf{q}_s, \xi_j^*, \xi_{-j}^*) \geq U_j(\mathbf{p}, \mathbf{q}_s, \xi_j, \xi_{-j}^*)$$

Théorème 5.2 *Pour chaque $\mathbf{q}_s \in Q_s$, $\mathbf{p} \in P_t$, le jeu $[K, \{\xi_j\}, \{U_j(\mathbf{p}, \mathbf{q}_s, \cdot)\}]$ admet un équilibre de Nash unique.*

Preuve. 16 *L'espace de stratégies conjoint Ξ est un sous-ensemble non vide, convexe et compact de l'espace euclidien R^M . En outre, la dérivée de second de l'utilité en ce qui concerne les la période de balisage (beaconing) est négative, comme indiqué ci-dessous :*

$$\frac{\partial^2 U_j}{\partial \xi_j^2} = \frac{(p_j - \nu_j) e^{-\lambda_j(\xi_j + T)} (e^{-\lambda_j m} - 1) (-2\delta_j^i + D_j \lambda_j)}{e^{\lambda_j T} - 1} \quad (5.15)$$

Nous supposons $p_j \geq \nu_j$ et $e^{-\lambda_j m} \leq 1$ puis,

$$\frac{\partial^2 U_j}{\partial \xi_j^2} \leq 0 \quad (5.16)$$

La deuxième dérivée de l'utilité par rapport à la période de balisage est négative, ce qui garantit l'existence d'un point d'équilibre de Nash. Le jeu $G(\mathbf{p}, \mathbf{q}_s)$ admet un point d'équilibre de Nash unique si la condition de solvabilité de la dominance [47] est satisfaite :

$$-\frac{\partial^2 U_j}{\partial \xi_j^2} \geq \sum_{n=1, n \neq j}^M \left| \frac{\partial^2 U_j}{\partial \xi_j \partial \xi_n} \right| \quad (5.17)$$

Le partiel mixte s'écrit :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_j}{\partial \xi_j \partial \xi_n} = & - \frac{P(T_j > T_n) \lambda_j e^{-\lambda_j T} (e^{\lambda_j m} - 1) \lambda_n e^{\lambda_n T}}{(e^{\lambda_j T} - 1)} \\ & \times (e^{-\lambda_n m} - 1) D_j(p_j - \nu_j) e^{-\lambda_j \xi_j - \lambda_n \xi_n} \\ & + \frac{\lambda_j e^{-\lambda_j T} (e^{\lambda_j m} - 1) \delta_j^n (p_j - \nu_j) e^{-\lambda_j \xi_j}}{e^{\lambda_j T} - 1} \\ & + \frac{\delta_j^j (p_j - \nu_j) \lambda_n e^{\lambda_n T} (e^{-\lambda_n m} - 1) e^{\lambda_n \xi_n}}{e^{-\lambda_n} - 1} \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_j}{\partial \xi_j \partial \xi_n} = & - \frac{P(T_j > T_n) \lambda_j e^{-\lambda_j T} (e^{\lambda_j m} - 1) \lambda_n e^{\lambda_n T}}{(e^{\lambda_j T} - 1)} (e^{-\lambda_n m} - 1) D_j(p_j - \nu_j) e^{-\lambda_j \xi_j - \lambda_n \xi_n} \\ & + \frac{\lambda_j e^{-\lambda_j T} (e^{\lambda_j m} - 1) \delta_j^n (p_j - \nu_j) e^{-\lambda_j \xi_j}}{e^{\lambda_j T} - 1} + \frac{\delta_j^j (p_j - \nu_j) \lambda_n e^{\lambda_n T} (e^{-\lambda_n m} - 1) e^{\lambda_n \xi_n}}{e^{-\lambda_n} - 1} \end{aligned} \quad (5.19)$$

donc,

$$\begin{aligned} - \frac{\partial^2 U_j}{\partial \xi_j^2} - \sum_{n=1, n \neq j}^M \left| \frac{\partial^2 U_j}{\partial \xi_j \partial \xi_n} \right| = & \quad (5.20) \\ & \frac{\lambda_j e^{-\lambda_j (T + \xi_j)} (e^{-\lambda_j m} - 1)}{e^{\lambda_j T} - 1} (p_j - \nu_j) \left(2\delta_j^j - \sum_{n=1, n \neq j}^M \delta_j^n \right) \\ & + \frac{e^{-\lambda_j \xi_j} (e^{-\lambda_j m} - 1)}{e^{\lambda_j T} - 1} D_j(p_j - \nu_j) \\ & \times \left(-\lambda_j^2 e^{-\lambda_j \xi_j} + \lambda_j e^{-\lambda_j T} \sum_{n=1, n \neq j}^M P(T_j > T_n) \lambda_n (e^{-\lambda_n m} - 1) e^{-\lambda_n \xi_n} \frac{e^{\lambda_n T}}{e^{\lambda_n} - 1} \right. \\ & \left. + \delta_j^j (p_j - \nu_j) \left(\frac{\lambda_j e^{-\lambda_j (T + \xi_j)} (e^{-\lambda_j m} - 1)}{e^{\lambda_j T} - 1} - \sum_{n=1, n \neq j}^M \frac{\lambda_n e^{\lambda_n (T - \xi_n)} (e^{-\lambda_n m} - 1)}{e^{\lambda_n} - 1} \right) \right) \geq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - \frac{\partial^2 U_j}{\partial \xi_j^2} - \sum_{n=1, n \neq j}^M \left| \frac{\partial^2 U_j}{\partial \xi_j \partial \xi_n} \right| = & \frac{\lambda_j e^{-\lambda_j (T + \xi_j)} (e^{-\lambda_j m} - 1)}{e^{\lambda_j T} - 1} (p_j - \nu_j) \left(2\delta_j^j - \sum_{n=1, n \neq j}^M \delta_j^n \right) \quad (5.21) \\ & + \frac{e^{-\lambda_j \xi_j} (e^{-\lambda_j m} - 1)}{e^{\lambda_j T} - 1} D_j(p_j - \nu_j) \left(-\lambda_j^2 e^{-\lambda_j \xi_j} + \lambda_j e^{-\lambda_j T} \sum_{n=1, n \neq j}^M P(T_j > T_n) \lambda_n (e^{-\lambda_n m} - 1) e^{-\lambda_n \xi_n} \frac{e^{\lambda_n T}}{e^{\lambda_n} - 1} \right. \\ & \left. + \delta_j^j (p_j - \nu_j) \left(\frac{\lambda_j e^{-\lambda_j (T + \xi_j)} (e^{-\lambda_j m} - 1)}{e^{\lambda_j T} - 1} - \sum_{n=1, n \neq j}^M \frac{\lambda_n e^{\lambda_n (T - \xi_n)} (e^{-\lambda_n m} - 1)}{e^{\lambda_n} - 1} \right) \right) \geq 0 \end{aligned}$$

Ainsi, le jeu $G(\mathbf{p}, \mathbf{q}_s)$ admet un point d'équilibre de Nash unique.

5.3.3 Jeu de QoS

Le jeu de la QoS est définie pour $\mathbf{p} \in P_t$ et $\xi \in \Xi$ fixés comme $G(\mathbf{p}, \xi) = [K, \{Q_{s_j}\}, \{U_j(\mathbf{p}, \cdot, \xi)\}]$.

Définition 5.3 Le vecteur QoS $\mathbf{q}_s^* = (q_{s_1}^*, \dots, q_{s_M}^*)$ est un équilibre de Nash pour le jeu de la QoS $G(\mathbf{p}_s, \xi)$ si

$$\forall (j, q_{s_j}) \in (K, Q_{s_j}), \quad U_j(\mathbf{p}, q_{s_j}^*, \mathbf{q}_{s_{-j}}^*, \xi) \geq U_j(\mathbf{p}, q_{s_j}, \mathbf{q}_{s_{-j}}^*, \xi)$$

Théorème 5.3 Pour chaque $\mathbf{p} \in P_t$ et $\xi \in \Xi$ du jeu $[K, \{Q_{s_j}\}, \{U_j(\mathbf{p}, \cdot, \xi)\}]$ admet un équilibre de Nash unique.

Preuve. 17 L'espace de stratégies Q_s est un sous-ensemble non vide, convexe et compact de l'espace euclidien R^M . De plus, la dérivée seconde de l'utilité en ce qui concerne les QoS est négative comme suit :

$$\frac{\partial^2 U_j}{\partial q_{s_j}^2} = -2\nu_j \leq 0 \quad (5.22)$$

La deuxième dérivée de l'utilité par rapport à la QoS est négative, ce qui garantit l'existence d'un point d'équilibre de Nash.

Afin de prouver l'unicité de l'équilibre de Nash du jeu $G(\mathbf{q}_s, \xi)$, nous suivons, [80], et nous définissons la somme pondérée des fonctions d'utilité :

$$\psi(q_s, x) = \sum_{j=1}^M x_j U_j(q_{s_j}, q_{s_{-j}}) \quad (5.23)$$

Le pseudo-gradient de (5.23) est donné par :

$$v(q_s, x) = \left[x_1 \nabla U_1(q_{s_1}, q_{s_{-1}}), \dots, x_M \nabla U_M(q_{s_M}, q_{s_{-M}}) \right]^T \quad (5.24)$$

La matrice jacobienne E du pseudo-gradient (en ce qui concerne la qualité de service) s'écrit :

$$E = \begin{pmatrix} x_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial q_{s_1}^2} & x_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial q_{s_1} \partial q_{s_2}} & \cdot & \cdot & \cdot & x_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial q_{s_1} \partial q_{s_M}} \\ x_2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial q_{s_2} \partial q_{s_1}} & x_2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial q_{s_2}^2} & \cdot & \cdot & \cdot & x_2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial q_{s_2} \partial q_{s_M}} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_M \frac{\partial^2 U_M}{\partial q_{s_M} \partial q_{s_1}} & x_M \frac{\partial^2 U_M}{\partial q_{s_M} \partial q_{s_2}} & \cdot & \cdot & \cdot & x_M \frac{\partial^2 U_M}{\partial q_{s_M}^2} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -2x_1\nu_1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & -2x_2\nu_2 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & -2x_M\nu_M \end{pmatrix}$$

Ainsi, E est défini négatif. Désormais, $[E + E^T]$ est également défini comme négatif et, selon [80], la somme pondérée des fonctions d'utilité $\psi(q_s,)$ est strictement concave dans la diagonale. Ainsi, le jeu $G(\mathbf{p}, \xi)$ admet un point d'équilibre de Nash unique.

5.4 Résultat Numériques

Dans cette section, nous analysons l'évaluation de performances du modèle non coopératif proposé au moyen de simulations. Nous considérons un scénario dans lequel deux UAV fournissent une couverture réseau aux utilisateurs au sol. Nous analyserons ici l'impact de divers paramètres, notamment le taux de rencontre et le coût de l'énergie, sur le prix, la qualité de service et le balisage (beconing) à l'équilibre de Nash.

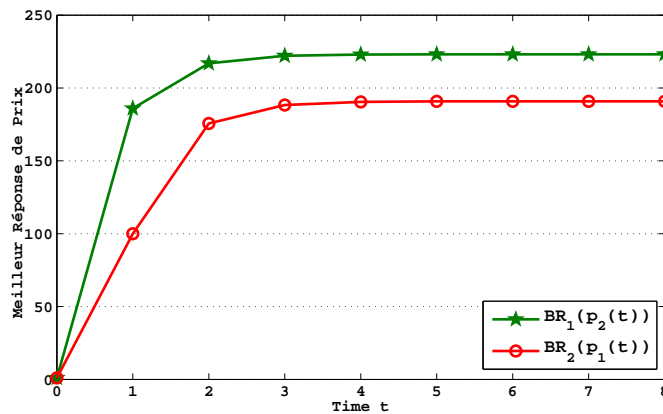


FIGURE 5.2 – Jeu de prix : Convergence à l'Equilibre de Nash.

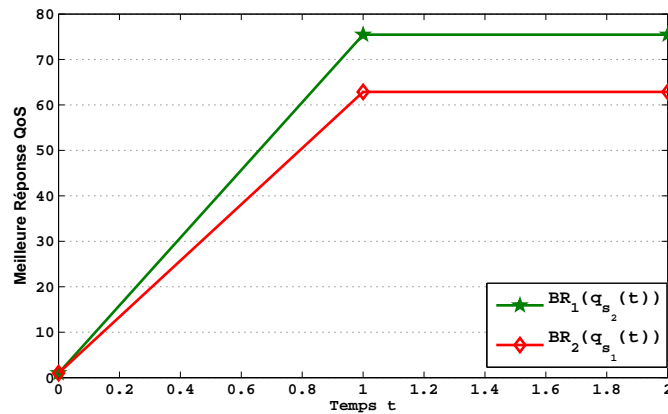


FIGURE 5.3 – Jeu de Qualité de Service : Convergence vers la QoS à l'Equilibre de Nash.

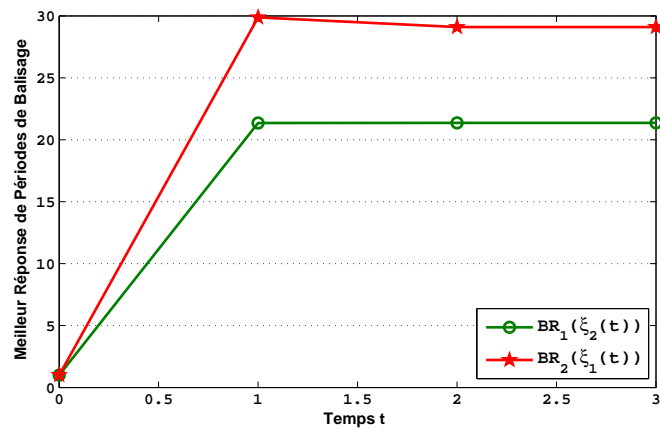


FIGURE 5.4 – Jeu de la Période de Balisage : Convergence vers l'Equilibre de Nash.

Les figures 5.2, 5.3 et 5.4 montrent le comportement de l'algorithme de la meilleure réponse dynamique dans le temps et sa convergence vers la période de balisage, la qualité de service et le prix à l'équilibre de Nash. Clairement, l'équilibre de Nash converge vers l'équilibre après un certain nombre d'itérations. Ensuite, l'algorithme utilisé dans le cadre de ce travail est capable de trouver efficacement le point d'équilibre de Nash.

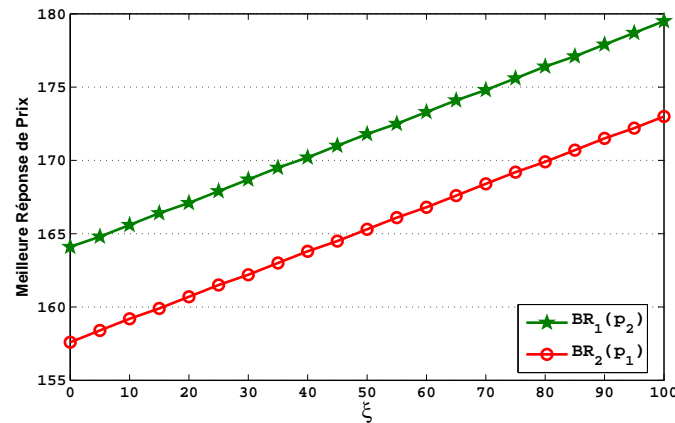


FIGURE 5.5 – Evolution de prix à l'Equilibre de Nash en Fonction de la Période de Balisage ξ .

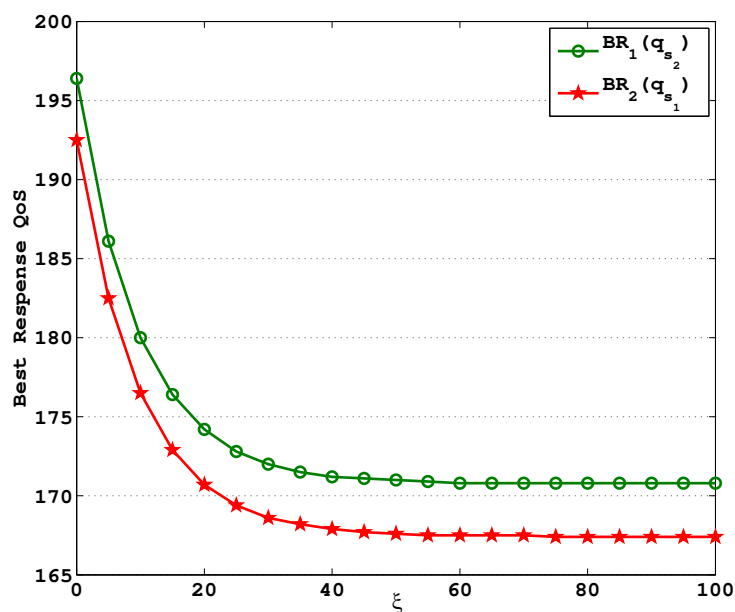
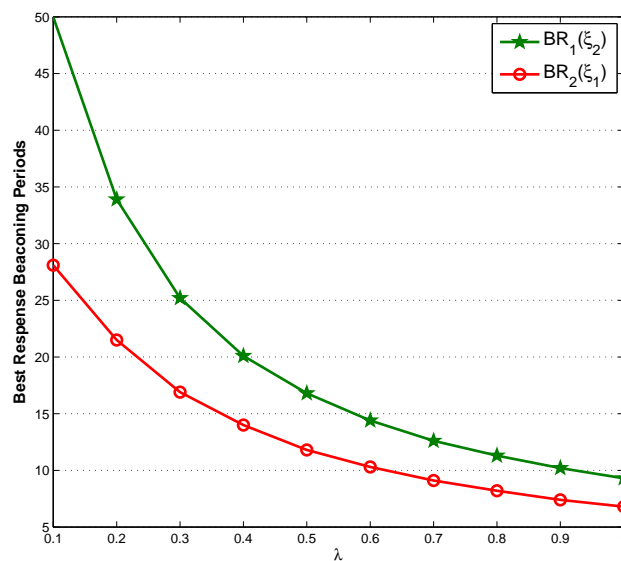
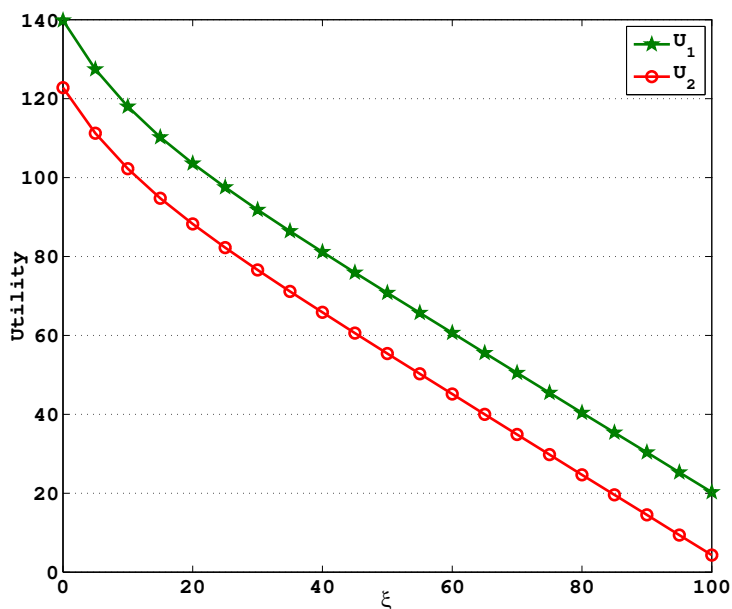


FIGURE 5.6 – Évolution de la Qualité de Service à l'Equilibre de Nash en Fonction de la Période de Balisage ξ .

Les figures 5.5 et 5.6 montrent l'impact de la durée du balisage ξ sur le prix et la qualité de service à l'équilibre de Nash. À mesure que la période de balisage augmente, le prix augmente et la qualité de service diminue. La raison en est que plus la période de balisage augmente, plus la consommation d'énergie augmente. Ensuite, le coût des énergies augmente. Par conséquent, les UAV doivent augmenter leurs prix et diminuer leur qualité de service pour compenser l'augmentation du coût de l'énergie.

FIGURE 5.7 – Evolution de la Période de Balisage à l'Equilibre de Nash par Rapport à λ .

La figure 5.7 montre la période de balisage obtenue avec le taux de rencontre en fonction de λ . Les périodes de balisage commencent à des valeurs élevées pour de faibles valeurs de taux de rencontre et diminuent à mesure que les taux de rencontre augmentent. Les résultats démontrent que lorsqu'un UAV a une forte probabilité de rencontrer des utilisateurs au sol, il aura besoin de périodes de balisage plus courtes et inversement pour assurer une couverture maximale aux utilisateurs au sol.

FIGURE 5.8 – Utilité en Fonction de ξ .

La figure 5.8 montre la fonction d'utilité de l'UAV en fonction de la période du balisage ξ . Les périodes de balisage plus longues ont tendance à être moins utiles que les périodes

de balisage plus courtes. La raison en est qu'au fur et à mesure que des périodes de balisage plus courtes sont choisies, le coût énergétique de l'envoi d'une balise est réduit.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous étudions l'interaction entre les UAV jouant le rôle de stations de base volantes. Les interactions entre les UAV sont caractérisées en termes de prix, de durée de balisage et de qualité de service. Nous modélisons le jeu non coopératif entre les UAV et nous prouvons l'existence et l'unicité de l'équilibre de Nash. Nous avons utilisé l'algorithme basé sur la meilleure réponse dynamique pour apprendre le point d'équilibre de Nash unique du jeu de manière distribuée. Les résultats numériques montrent la convergence vers l'équilibre de Nash et l'impact d'un paramètre du système sur les stratégies d'UAV.

Conclusion Générale et Perspectives

Dans cette thèse, nous avons modélisé et analysé les différentes situations d'interactions entre les acteurs des réseaux de communication à l'aide de modèles de la théorie des jeux. Nous avons examiné deux aspects qui influent sur le rendement. Nous avons examiné les effets des paramètres techniques et économiques sur les politiques des acteurs de réseaux de télécommunications.

L'un de nos objectifs était notamment d'évaluer l'effet de la modélisation statique et dynamique de la rationalité limitée des utilisateurs sur les décisions des fournisseurs de services et sur leur investissement pour attirer plus d'utilisateurs à s'inscrire dans leurs services. Nous avons présenté et analysé certains modèles conjoints prix-QoS dans le contexte est de favoriser l'investissement et répondre aux exigences des utilisateurs en matière de la connectivité en exploitant les drones pour quelques zones géographiques, de la QoE dont les fournisseurs de distribution de contenu CDN permettent de cacher les contenus dans des serveurs distribués aux zones plus proches aux utilisateurs, etc.

Nous avons commencé ce rapport par une introduction aux méthodologies fréquemment utilisées pour analyser les interactions entre des acteurs égoïstes cherchant chacun à maximiser leurs revenus. Pour fonder sur l'utilisation de l'approche de la théorie des jeux, nous avons présenté un état de l'art des travaux réalisés dans ce sens ainsi que leurs apports aux problématiques traitées. Nous avons également décrit le cadre général de notre thèse, nos motivations et nos contributions.

Nous avons présenté, ensuite, les bases et les principes fondamentaux de la théorie des jeux utilisés dans cette thèse pour modéliser et analyser les politiques des différents acteurs dans les réseaux de communications.

Ensuite, nous avons formulé un modèle théorique de jeu non coopératif conjoint prix-QoS pour modéliser l'impact de la rationalité limitée statique, en utilisant le modèle de Luce, sur les décisions des fournisseurs de services. Nous avons montré que le jeu converge vers un point d'équilibre connu sous le nom d'équilibre de Nash (NE). Nous avons utilisé l'algorithme de la meilleure réponse pour l'apprentissage de cet équilibre en présentant les résultats obtenus et en précisant la stratégie d'équilibre du système. Nous avons utilisé le prix de l'anarchie pour mesurer l'efficacité de cet équilibre. L'algorithme proposé converge très rapidement vers un unique point d'équilibre qui représente les stratégies de prix et de QoS à choisir par chaque opérateur. Nous avons montré que les fournisseurs de services ont

l'intérêt de créer la confusion dans le système pour perturber les décisions des utilisateurs.

Dans la suite, nous avons modélisé le dynamisme de la rationalité bornée des utilisateurs avec utilisation dans ce cas d'une fonction de la demande linéaire. Le souci était venu de la nécessité de considérer que « le comportement du client d'aujourd'hui n'est plus celui du demain » ce qui montre que les revenus des fournisseurs de services ne vont pas les mêmes au futur et ça dépend de la vitesse avec laquelle les clients changent leur comportement. Nous avons reformulé les utilités des fournisseurs de service dans un intervalle de temps en l'attachant avec un facteur d'actualisation. Ainsi, nous avons montré qu'il y a une relation avec la vitesse du changement du comportement des clients avec l'amélioration des services dans les réseaux de communication.

Pour étudier les relations techniques et économiques entre les acteurs de la chaîne de la distribution du contenu Internet, nous avons considéré un écosystème composant de plusieurs fournisseurs de contenu CPs et plusieurs fournisseurs de réseaux de distribution du contenu CDNs. Nous avons pu modéliser et analyser les interactions existantes entre eux. Après avoir soulevé le problème de décision sur les paramètres communs, nous avons proposé de reformuler les utilités des acteurs entrant en jeu de négociation (Bargaining Game). Nous avons tiré de cet étude que la solution de la négociation permet de lutter contre les comportements discriminatoires des acteurs dans les réseaux de communication.

Ensuite, nous avons élaboré un nouveau cadre pour d'utilisation de l'UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) qui sont exploités récemment pour couvrir l'accès aux services de réseau pour une telle zone géographique (zones rurales, militaires, maritimes, . . .) avec un paramétrage basé sur la disponibilité, le prix d'accès et la qualité du service. Nous avons proposé une modélisation d'un jeu non coopératif entre les drones. Plus précisément, nous avons montré l'existence et l'unicité de l'équilibre de Nash dans certaines conditions. Ainsi, nous avons implémenté l'algorithme de la meilleure réponse dynamique comme méthode d'apprentissage qui permet aux drones de trouver rapidement la situation d'équilibre de Nash d'une manière distribuée. Enfin, l'analyse numérique effectuée à base d'un simple scénario offre des perspectives encourageantes aux drones sur la façon de choisir les paramètres et les contrôler pour arriver à la situation de l'équilibre.

Actuellement, nous étudions le problème de la gestion des interférences et d'énergies dans les réseaux à couverture par les drones. Le problème est modélisé avec la théorie de jeu à champ moyen qui est une théorie récente de la théorie de jeux. Le souci d'utiliser cette théorie est que les jeux classiques ne peuvent pas supporter un grand nombre de joueurs. Ce qui n'est pas le cas pour le champ moyen qui considère la réaction d'un joueur avec le champ moyen appliqué par ses adversaires (infinité).

La fidélisation est l'une des techniques permettant, aux opérateurs dans les réseaux de

communications, de motiver les abonnées à continuer la souscription dans leurs services. Pour cela, nous essayons de modéliser cette fidélisation des utilisateurs et son implication sur les politiques des acteurs dans les réseaux de communications.

Ainsi, proposer un nouveau algorithme de la gestion de la mise en cache du contenu pour servir les fournisseurs de réseau de distribution du contenu en prenant en considération les paramètres tels que la taille de caches, la popularité d'un contenu et dans quelle zone, la capacité des liens réseaux, etc.

Les réseaux 5G sont des technologies conçues pour répondre à la très grande croissance des données et à la connectivité de la société. Pour cet effet, l'un des objectifs de la 5G est d'intégrer dans un seul réseau physique des services variés (ce mécanisme est appelé « network slicing »), ayant chacun des exigences spécifiques, de sorte que chaque service puisse utiliser un réseau logique adapté à ses exigences. Une instance de « slice » réseau peut être définie comme un ensemble de fonctions réseau et de ressources permettant de les exécuter et constituant un réseau logique avec les caractéristiques requises par le service demandé. Dans ce contexte, nous envisageons à modéliser, étudier et résoudre, en utilisant les outils d'optimisation (programmation linéaire, théorie des jeux, ...) le problème d'allocation de ressources physiques à chaque slice.

Bibliographie

- [1] Cisco Visual Networking Index : Forecast and Methodology, 2016–2021. Technical report, 2017. [84](#)
- [2] E. Ahmed, H. N. Agiza, and Samia Hassan. On modifications of Puu’s dynamical duopoly. *Chaos, Solitons & Fractals*, 11(7) :1025–1028, June 2000. [42](#)
- [3] Driss Ait Omar, Mohamed El Amrani, Mohamed Baslam, and Mohamed Fakir. A Game-Theoretic Approach for the Internet Content Distribution Chain. In Andreas Podelski and François Taïani, editors, *Networked Systems*, Lecture Notes in Computer Science, pages 270–285. Springer International Publishing, 2019. [102](#), [106](#)
- [4] Driss Ait Omar, Hamid Garmani, Mohamed El Amrani, Mohamed Baslam, and Mohamed Fakir. Analyzing the Customers’ Dynamic Confusion in Telecommunication Networks Share Game :. *International Journal of Business Data Communications and Networking*, 15(2) :15–34, July 2019. [20](#)
- [5] Driss Ait Omar, Hamid Garmani, Mohamed El Amrani, Mohamed Baslam, and Mohamed Fakir. A Customer Confusion Environment in Telecommunication Networks : Analysis and Policy Impact. *International Journal of Cooperative Information Systems*, 28(02) :1930002, April 2019. [102](#)
- [6] Driss Ait Omar, M’Hamed Outanoute, Mohamed Baslam, Mohamed Fakir, and Belaid Bouikhalene. On understanding price-QoS war for competitive market and confused consumers. *Computing*, 101(9) :1327–1348, September 2019. [62](#), [102](#)
- [7] Driss Ait Omar, M’hamed Outanoute, Mohamed Baslam, Mohamed Fakir, and Belaid Bouikhalne. Joint Price and QoS Competition with Bounded Rational Customers. In *Networked Systems*, pages 457–471. Springer, Cham, May 2017. [45](#), [63](#), [64](#), [68](#), [101](#), [102](#)
- [8] Eitan Altman, Dhiman Barman, Rachid El Azouzi, David Ros, and Bruno Tuffin. Pricing differentiated services : A game-theoretic approach. *Computer Networks*, 50(7) :982–1002, May 2006. [20](#)
- [9] Eitan Altman, Arnaud Legout, and Yuedong Xu. Network non-neutrality debate : An economic analysis. In *International Conference on Research in Networking*, pages 68–81. Springer, 2011. [68](#)

- [10] Mohamed El Amrani, Hamid Garmani, Mohamed Baslam, Brahim Minaoui, and Rachid El Ayachi. Cournot Game of ISP under Net Neutrality. *International Journal of Control and Automation*, 11(7) :81–96, July 2018. [20](#)
- [11] Rachid El Azouzi, Eitan Altman, and Laura Wynter. Telecommunications network equilibrium with price and quality-of-service characteristics. In R. Lehnert J. Charzinski and P. Tran-Gia, editors, *Providing Quality of Service in Heterogeneous Environments Proceedings of the 18th International Teletraffic Congress - ITC-18*, volume 5 of *Teletraffic Science and Engineering*, pages 369 – 378. Elsevier, 2003. [107](#)
- [12] Mohamed BASLAM. *News insights on interaction among service providers : A combined technico-economic analysis*. PhD thesis, Université Mohamed V, Rabat, May 2013. [19](#)
- [13] Mohamed Baslam, Loubna Echabbi, Rachid El-Azouzi, and Essaid Sabir. Joint Price and QoS Market Share Game with Adversarial Service Providers and Migrating Customers. In Rahul Jain and Rajgopal Kannan, editors, *Game Theory for Networks*, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, pages 642–657. Springer Berlin Heidelberg, 2012. [20](#)
- [14] Mohamed Baslam, Rachid El-Azouzi, Essaid Sabir, and El Houssine Bouyakhf. New insights from a bounded rationality analysis for strategic price-QoS war. In *6th International ICST Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools*, pages 280–289, October 2012. [40](#), [42](#), [64](#)
- [15] Mohamed Baslam, Rachid El-Azouzi, Essaid Sabir, and Loubna Echabbi. Market share game with adversarial access providers : A neutral and a non-neutral network analysis. In *Network Games, Control and Optimization (NetGCooP), 2011 5th International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2011. [66](#), [86](#)
- [16] Mohamed Baslam, Rachid El-Azouzi, Essaid Sabir, Loubna Echabbi, and El-Houssine Bouyakhf. A Game Theoretic Analysis of Price-QoS Market Share in Presence of Adversarial Service Providers. In Hardy Hanappi, editor, *Game Theory Relaunched*. InTech, March 2013. [64](#)
- [17] Suren Basov. *Social Norms, Bounded Rationality and Optimal Contracts*, volume 30 of *Studies in Economic Theory*. Springer Singapore, Singapore, 2016. DOI : 10.1007/978-981-10-1041-5. [38](#), [41](#), [64](#)
- [18] Suren Basov and Svetlana Danilkina. Bertrand Oligopoly with Boundedly Rational Consumers. *The B.E. Journal of Theoretical Economics*, 15(1) :107–123, 2014. [42](#), [43](#)

- [19] Fernando Bernstein and Awi Federgruen. A General Equilibrium Model for Industries with Price and Service Competition. *Operations Research*, 52(6) :868–886, December 2004. [66](#)
- [20] Gian Italo Bischi and Ahmad Naimzada. Global Analysis of a Dynamic Duopoly Game with Bounded Rationality. In *Advances in Dynamic Games and Applications*, Annals of the International Society of Dynamic Games, pages 361–385. Birkhäuser, Boston, MA, 2000. DOI : 10.1007/978-1-4612-1336-9_20. [42](#)
- [21] Zhihao Cai, Hui Zhou, Jiang Zhao, Kun Wu, and Yingxun Wang. Formation Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles by Event-Triggered Distributed Model Predictive Control. *IEEE Access*, 6 :55614–55627, 2018. [103](#)
- [22] Ioana Chioveanu and Jidong Zhou. Price Competition with Consumer Confusion. *Management Science*, 59(11) :2450–2469, May 2013. [42](#)
- [23] Jongsawas Chongwatpol. An Analysis of Pricing Telecommunications Network Services with Data Mining Methods. In *Diversity, Technology, and Innovation for Operational Competitiveness : Proceedings of the 2013 International Conference on Technology Innovation and Industrial Management*, pages 1–26–37. ToKnowPress, 2013. [62](#)
- [24] Bishop Christopher. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, 2006. [43](#)
- [25] Scott Condie and Jayant Ganguli. The pricing effects of ambiguous private information. *Journal of Economic Theory*, 172 :512–557, November 2017. [42](#), [64](#)
- [26] Pierre Coucheney, Patrick Maille, and Bruno Tuffin. Impact of competition between isps on the net neutrality debate. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 10(4) :425–433, 2013. [64](#)
- [27] Costas Courcoubetis and Richard Weber. *Pricing Communication Networks : Economics, Technology and Modelling*. Wiley, 1 edition, March 2003. [20](#)
- [28] Jingjing Cui, Yuanwei Liu, and Arumugam Nallanathan. Multi-Agent Reinforcement Learning Based Resource Allocation for UAV Networks. *arXiv :1810.10408 [eess]*, October 2018. arXiv : 1810.10408. [103](#)
- [29] Luiz A. DaSilva. Pricing for QoS-enabled networks : A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 3(2) :2–8, 2000. [20](#)
- [30] Vaggelis G. Douros, Salah Eddine Elayoubi, Eitan Altman, and Yezekael Hayel. Caching games between Content Providers and Internet Service Providers. *Performance Evaluation*, 113 :13–25, August 2017. [70](#), [73](#)

- [31] Abdelalim A. Elsadany. Dynamics of a delayed duopoly game with bounded rationality. *Mathematical and Computer Modelling*, 52(9) :1479–1489, November 2010. [42](#)
- [32] Hamid Garmani, Mohamed Baslam, and Mostafa Jourhmane. Analysis of Competition between CPs Fronting Advertisers. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 117 :53–66, August 2018. [20](#), [102](#)
- [33] Hamid Garmani, M'hamed Outanoute, Mohamed Baslam, and Mostafa Jourhmane. New Competition-Based Approach for Caching Popular Content in ICN. In Andreas Podelski and François Taïani, editors, *Networked Systems*, Lecture Notes in Computer Science, pages 286–300. Springer International Publishing, 2019. [102](#)
- [34] Maryam Ghasemi and Ibrahim Matta. Pricing differentiated brokered internet services. In *2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pages 124–129, April 2016. [20](#)
- [35] Hakim Ghazzai, Abdullah Kadri, Mahdi Ben Ghorbel, Hamid Menouar, and Yehia Massoud. A Generic Spatiotemporal UAV Scheduling Framework for Multi-Event Applications. *IEEE Access*, 7 :215–229, 2019. [102](#)
- [36] Eric Gourdin, Patrick Maillé, Gwendal Simon, and Bruno Tuffin. The Economics of CDNs and Their Impact on Service Fairness. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 14(1) :22–33, March 2017. [84](#)
- [37] Luis Guijarro, Vicent Pla, Jose R. Vidal, and Jorge Martinez-Bauset. Analysis of price competition under peering and transit agreements in Internet Service provision to peer-to-peer users. In *2011 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pages 1145–1149, January 2011. [54](#)
- [38] Werner Güth, Rolf Schmittberger, and Bernd Schwarze. An experimental analysis of ultimatum bargaining. *Journal of economic behavior & organization*, 3(4) :367–388, 1982. [37](#)
- [39] Manjesh Kumar Hanawal. *Analyse des effets spatiaux et aspects économiques dans les réseaux de communications*. PhD thesis, Université d'Avignon, Avignon, January 2013. [19](#)
- [40] Sara Handouf, Sara Arabi, Essaid Sabir, and Mohammed Sadik. Telecommunication market share game : Inducing boundedly rational consumers via price misperception. In *2017 IEEE/ACS 13th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA)*, pages 1–7, September 2017. [42](#), [64](#), [65](#)

- [41] Sara Handouf and Essaid Sabir. Strategic Availability and Cost-Effective UAV-Based Flying Access Networks : S-Modular Game Analysis. *Mobile Information Systems*, 2019 :1–11, January 2019. [103](#), [105](#)
- [42] Pingting Hao, Liang Hu, Kuo Zhao, Jingyan Jiang, Tong Li, and Xilong Che. Dynamic pricing with traffic engineering for adaptive video streaming over software-defined content delivery networking. *Multimedia Tools and Applications*, 78(3) :3471–3492, February 2019. [20](#)
- [43] Hee-Su Kim and Choong-Han Yoon. Determinants of subscriber churn and customer loyalty in the Korean mobile telephony market. *Telecommunications Policy*, 28(9) :751–765, October 2004. [43](#)
- [44] Leonard Kleinrock. *Queueing Systems, Volume I*, volume Volume I. Wiley Interscience, 1975. [50](#), [68](#)
- [45] Sara Koulali, Essaid Sabir, Tarik Taleb, and Mostafa Azizi. A green strategic activity scheduling for UAV networks : A sub-modular game perspective. *IEEE Communications Magazine*, 54(5) :58–64, May 2016. [103](#)
- [46] Elias Koutsoupias and Christos Papadimitriou. Worst-case equilibria. *Computer Science Review*, 3(2) :65–69, May 2009. [54](#), [76](#), [97](#)
- [47] Samson Lasaulce, Mérouane Debbah, and Eitan Altman. Methodologies for analyzing equilibria in wireless games. *IEEE Signal Processing Magazine*, 26(5) :41–52, September 2009. [48](#), [52](#), [70](#), [73](#), [108](#), [109](#)
- [48] Joe Lorkowski and Vladik Kreinovich. *Bounded Rationality in Decision Making Under Uncertainty : Towards Optimal Granularity*, volume 99 of *Studies in Systems, Decision and Control*. Springer International Publishing, Cham, 2018. DOI : 10.1007/978-3-319-62214-9. [38](#), [42](#), [64](#)
- [49] R. Duncan Luce. *Individual choice behavior : A theoretical analysis*. Dover publications, Inc. Mineola, New York, first edition edition edition, 2012. [64](#)
- [50] Richard T. B. Ma, Jingjing Wang, and Dah Ming Chiu. Paid Prioritization and Its Impact on Net Neutrality. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(2) :367–379, February 2017. [20](#)
- [51] Patrick Maillé, Gwendal Simon, and Bruno Tuffin. Vertical Integration of CDN and Network Operator : Model and Analysis. In *2016 IEEE 24th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS)*, pages 189–195, September 2016. [84](#)
- [52] Patrick Maillé and Bruno Tuffin. Impact of Content Delivery Networks on service and content innovation. In *NetEcon 2015 : the 10th Workshop on the Economics*

- of Networks, Systems and Computation*, pages 1 – 4, Portland, United States, June 2015. [20](#)
- [53] Patrick Maillé and Bruno Tuffin. Preventing competition using side payments : when non-neutrality creates barriers to entry. *NETNOMICS : Economic Research and Electronic Networking*, 18(1) :3–22, May 2017. [69](#)
- [54] Patrick Maillé and Bruno Tuffin. Wireless Service Providers Pricing Game in Presence of Possible Sponsored Data. page 15, 2019. [20](#)
- [55] Patrick Maillé, Bruno Tuffin, Joshua Peignier, and Estelle Varloot. Pricing of Co-existing Cellular and Community Networks. In Jean Walrand, Quanyan Zhu, Yeze-kael Hayel, and Tania Jimenez, editors, *Network Games, Control, and Optimization, Static & Dynamic Game Theory : Foundations & Applications*, pages 1–16. Springer International Publishing, 2019. [20](#)
- [56] Patrick Maillé, Maurizio Naldi, and Bruno Tuffin. Price war with migrating customers. In *2009 IEEE International Symposium on Modeling, Analysis Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, pages 1–8, September 2009. [43](#)
- [57] Patrick Maillé, Gwendal Simon, and Bruno Tuffin. Toward a net neutrality debate that conforms to the 2010s. *IEEE Communications Magazine*, 54(3) :94–99, 2016. [84](#)
- [58] Patrick Maillé and Bruno Tuffin. Analysis of Price Competition in a Slotted Resource Allocation Game. In *IEEE INFOCOM 2008 - The 27th Conference on Computer Communications*, April 2008. [54](#)
- [59] Patrick Maillé and Bruno Tuffin. How do content delivery networks affect the economy of the internet and the network neutrality debate? In *International Conference on Grid Economics and Business Models*, pages 222–230. Springer, 2014. [84](#)
- [60] Antonio Mele and Francesco Sangiorgi. Uncertainty, information acquisition, and price swings in asset markets. *The Review of Economic Studies*, 82(4) :1533–1567, 2015. [42](#), [64](#)
- [61] Paul Milgrom and John Roberts. Rationalizability, Learning, and Equilibrium in Games with Strategic Complementarities. *Econometrica*, 58(6) :1255–1277, 1990. [48](#), [52](#), [91](#)
- [62] Mbazingwa E. Mkiramweni and Chungang Yang. Energy Efficiency Optimization for Wireless Unmanned Aerial Vehicle Communication Networks : A Bargaining Game Approach. In *2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pages 1–6. IEEE, 2018. [103](#)

- [63] Naser Hossein Motlagh, Miloud Bagaa, and Tarik Taleb. Uav selection for a uav-based integrative iot platform. In *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2016 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2016. [102](#)
- [64] Naser Hossein Motlagh, Miloud Bagaa, and Tarik Taleb. UAV-based IoT platform : A crowd surveillance use case. *IEEE Communications Magazine*, 55(2) :128–134, 2017. [102](#)
- [65] Naser Hossein Motlagh, Tarik Taleb, and Osama Arouk. Low-altitude unmanned aerial vehicles-based internet of things services : Comprehensive survey and future perspectives. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(6) :899–922, 2016. [102](#)
- [66] Toufik Mouhyiddine, Essaid Sabir, and Mohammed Sadik. Telecommunications market share game with ambiguous pricing strategies. In *2014 International Conference on Next Generation Networks and Services (NGNS)*, pages 202–208, May 2014. [42](#), [64](#)
- [67] Herve Moulin. On the uniqueness and stability of Nash equilibrium in non-cooperative games. In Alain Benoussan, Paul R. Kleindorfer, and Charles S. Tapiero, editors, *Applied Stochastic Control in Econometrics and Management Science*, page 271. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1980. [48](#), [52](#), [91](#)
- [68] Ariel Orda, Raphael Rom, and Nahum Shimkin. Competitive Routing in Multiuser Communication Networks. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 1(5) :510–521, October 1993. [50](#)
- [69] M’hamed Outanoute, Hamid Garmani, Mohamed Baslam, Rachid El Ayachi, and Belaid Bouikhalene. A Non-Cooperative Game Analysis of Competition between Content Providers in the Internet Market. *International Journal of Business Data Communications and Networking (IJBDCN)*, 15(1) :88–104, January 2019. [20](#)
- [70] Sravan Patchala, Seung Hyun Lee, Changhee Joo, and D. Manjunath. On the Economics of Network Interconnections and Net Neutrality. In *2019 11th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS)*, pages 192–199, Bengaluru, India, January 2019. IEEE. [20](#)
- [71] Al-Mukaddim Khan Pathan and Rajkumar Buyya. A taxonomy and survey of content delivery networks. *Grid Computing and Distributed Systems Laboratory, University of Melbourne, Technical Report*, 4, 2007. [83](#)
- [72] Thierry Pénard. La théorie des jeux et les outils d’analyse des comportements stratégiques. *université de Rennes 1*, 1 :10–15, Octobre 2004. [25](#)

- [73] Jan Plachy, Zdenek Becvar, Pavel Mach, Radek Marik, and Michal Vondra. Joint Positioning of Flying Base Stations and Association of Users : Evolutionary-Based Approach. *IEEE Access*, 7 :11454–11463, 2019. [103](#)
- [74] Timothy J. Pleskac. Decision and choice : Luce’s choice axiom. *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*, 5 :895–900, 2012. [43](#)
- [75] Jiayin Qi, Yangming Zhang, Yingying Zhang, and Shuang Shi. TreeLogit Model for Customer Churn Prediction. In *2006 IEEE Asia-Pacific Conference on Services Computing (APSCC’06)*, pages 70–75, December 2006. [43](#)
- [76] Matthew Rabin. Incorporating fairness into game theory and economics. *The American economic review*, pages 1281–1302, 1993. [38](#)
- [77] Toky Basilide Ravaliminoarimalalason. *Application de la Théorie des Jeux au Partage des Ressources d’un Réseau de File d’Attente*. PhD thesis, Université d’Antananarivo, 2016. [25](#)
- [78] Lilia Rebaï and David Flacher. Complexité tarifaire et choix de consommation. Une application aux services de télécommunications en Tunisie. *Revue d’économie industrielle*, (143) :133–176, November 2013. [20](#)
- [79] Hang Ren and Tingliang Huang. Modeling customer bounded rationality in operations management : A review and research opportunities. *Computers & Operations Research*, 91 :48–58, March 2018. [38](#), [41](#)
- [80] J. B. Rosen. Existence and Uniqueness of Equilibrium Points for Concave N-Person Games. *Econometrica*, 33(3) :520–534, 1965. [48](#), [52](#), [70](#), [72](#), [75](#), [91](#), [92](#), [93](#), [96](#), [111](#), [112](#)
- [81] Tim Roughgarden, Vasilis Syrgkanis, and Eva Tardos. The Price of Anarchy in Auctions. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 59 :59–101, 2017. [54](#)
- [82] Jagruti Sahoo, Mohammad Salahuddin, Roch Glitho, Halima Elbiaze, and Wesam Ajib. A Survey on Replica Server Placement Algorithms for Content Delivery Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016. [83](#)
- [83] Paurav Shukla, Madhumita Banerjee, and Phani Tej Adidam. Antecedents and consequences of consumer confusion : Analysis of the financial services industry. *ACR North American Advances*, 2010. [64](#)
- [84] Herbert Simon and James March. *Administrative Behavior and Organizations*. New York : Free Press, 1976. [38](#)
- [85] Herbert A Simon. *Models of man : social and rational*. Wiley, New York, 1957. OCLC : 165735. [40](#), [62](#)

- [86] Konstantinos Stamos, George Pallis, Athena Vakali, and Marios D. Dikaiakos. Evaluating the utility of content delivery networks. In *Proceedings of the 4th edition of the UPGRADE-CN workshop on Use of P2P, GRID and agents for the development of content networks*, pages 11–20. ACM, 2009. [84](#)
- [87] Burkhard Stiller, Peter Reichl, and Simon Leinen. Pricing and Cost Recovery for Internet Services : Practical Review, Classification, and Application of Relevant Models. *Netnomics*, 3(2) :149–171, 2001. [20](#)
- [88] Volker Stocker, Georgios Smaragdakis, William Lehr, and Steven Bauer. The growing complexity of content delivery networks : Challenges and implications for the Internet ecosystem. *Telecommunications Policy*, 41(10) :1003–1016, November 2017. [84](#)
- [89] Richard S. Sutton and Andrew G. Barto. Reinforcement Learning, 2012. [43](#)
- [90] E. E. Tsiropoulou, G. K. Katsinis, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou. Efficient uplink power control in multi-service two-tier femtocell networks via a game theoretic approach. In *2013 IEEE 18th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, pages 104–108, September 2013. [64](#)
- [91] Bruno Tuffin. Charging the Internet Without Bandwidth Reservation : An Overview and Bibliography of Mathematical Approaches. page 22, 2003. [20](#)
- [92] Bruno Tuffin. Network Neutrality : Modeling and Challenges and Its Impact on Clouds. *International Conference on the Economics of Grids , Clouds, Systems, and Services*, 2017. [84](#)
- [93] Panagiotis Vamvakas, Eirini Eleni Tsiropoulou, and Symeon Papavassiliou. Dynamic Provider Selection & Power Resource Management in Competitive Wireless Communication Markets. *Mobile Networks and Applications*, 23(1) :86–99, February 2018. [63](#)
- [94] Panagiotis Vamvakas, Eirini Eleni Tsiropoulou, Marinos Vomvas, and Symeon Papavassiliou. Adaptive power management in wireless powered communication networks : a user- centric approach. In *2017 IEEE 38th Sarnoff Symposium*, pages 1–6, September 2017. [64](#)
- [95] John B Van Huyck, Raymond C Battalio, and Richard O Beil. Tacit coordination games, strategic uncertainty, and coordination failure. *The American Economic Review*, 80(1) :234–248, 1990. [34](#)
- [96] Hal R. Varian. Microeconomic Analysis | W. W. Norton & Company, 1992. [54](#)

- [97] John von Neumann and Oskar Morgenstern. Theory of Games and Economic Behavior, 1944. [41](#), [62](#)
- [98] John Von Neumann, Oskar Morgenstern, et al. Theory of games and economic behavior, 1944. [24](#), [37](#)
- [99] Mahmoud Yassen and H. N. Agiza. Analysis of a duopoly game with delayed bounded rationality. *Applied Mathematics and Computation*, 138(2) :387–402, June 2003. [42](#)
- [100] Yong Zeng, Rui Zhang, and Teng Joon Lim. Wireless communications with unmanned aerial vehicles : opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5) :36–42, May 2016. [102](#)
- [101] Qixun Zhang, Menglei Jiang, Zhiyong Feng, Wei Li, Wei Zhang, and Miao Pan. IoT Enabled UAV : Network Architecture and Routing Algorithm. *IEEE Internet of Things Journal*, pages 1–1, 2019. [103](#)