



# Incitation à la mise en cache dans les réseaux d'internet de véhicules

## 2.1 Introduction

Avec l'évolution rapide des technologies de communication mobile et la prolifération des appareils intelligents (smart phones, tablettes, ordinateurs portables, etc.) et des applications (Wechat, Facebook, YouTube, Netflix, etc.), les utilisateurs mobiles souhaitent accéder à leurs contenus partout et à tous moment, plus particulièrement dans les transports que ce soit dans des véhicules personnels, ou dans des transports en commun. Une tendance qui peut générer une augmentation exponentielle de trafic de données mobiles. Ce phénomène va rapidement causer l'épuisement des ressources déjà limitées des liens sans fil et plus particulièrement la saturation des liens backhauls entre le réseau d'accès et le réseau cœur. Cela est principalement dû aux accès redondants au contenu multimédia de plus en plus gourmand en bande passante. Pour faire face à ce problème, une solution innovante a été proposée en déplaçant le contenu populaire des utilisateurs finaux vers des nœuds plus proches de l'utilisateur mobile (*ex.* stations de base cellulaires, les points d'accès, les appareils mobiles des utilisateurs, les véhicules, etc.) afin de servir les requêtes des utilisateurs localement et libérer par la suite les liens backhauls [31]. Cette solution est appelée la technique de mise en cache ou *caching* en anglais.

La technique de mise en cache a attiré une attention considérable par la communauté des chercheurs, car elle peut réduire efficacement la charge de trafic sur les liens de réseau cœur en éliminant la transmission des données redondantes. En réalité, il y a principalement deux acteurs qui gèrent la mise en cache de contenu qui sont : les fournisseurs de contenu (Content provider, CP), comme YouTube et Netflix, qui proposent des contenus populaires et veulent les rapprocher de leurs utilisateurs finaux afin d'améliorer la qualité d'expérience (Quality of Experience, QoE) ; et les gestionnaires des caches, tels que les opérateurs de réseau mobile

(Mobile Network Operator, MNO), qui déploient et gèrent des espaces de stockage (caches) et proposent la location de ces caches en espérant gagner des profits financiers [32], [33]. Récemment, des mécanismes d'incitation [4] [34] [35] ont été proposés pour encourager ces deux acteurs à collaborer pour assurer une mise en cache plus efficace.

Nous présentons dans ce chapitre, une vue d'ensemble sur les techniques de mise en cache dans les réseaux de véhicules. Nous commençons par donner les définitions de bases de la mise en cache et les avantages de l'incitation pour les réseaux de véhicules dans la section 2.2. Ensuite, nous présentons un survol bibliographique sur les principaux travaux sur l'incitation à la mise en cache dans la section 2.3. Nous terminons le chapitre par une conclusion dans la section 2.5.

## 2.2 Technique de mise en cache

La technique de mise en cache a réussi à prouver son utilité dans la plupart des systèmes et réseaux informatiques surtout avec l'augmentation du trafic de données mobiles sans fil en raison de l'augmentation sans cesse des utilisateurs mobiles et de leurs applications gourmandes en bande passante.

Dans cette section, nous allons définir la technique de la mise en cache, décrire l'incitation à la mise en cache et présenter ces apports pour les réseaux de véhicules.

### 2.2.1 Définition

La technique de mise en cache, ou *caching* en anglais, a été proposée comme une solution prometteuse pour le problème d'explosion de trafic de données mobiles. La mise en cache consiste à stocker les contenus populaires (*i.e.* le contenu fréquemment demandé par les utilisateurs) localement dans des caches (des espaces mémoires) déployés sur des nœuds physiquement proches de l'utilisateur final (station de base cellulaires, véhicules, etc.) pour atténuer la surcharge sur le backhaul de réseau cœur [33].

Il existe deux principaux acteurs qui interviennent lors de la mise en cache de contenu : les fournisseurs de contenu (Content Provider, CP), comme YouTube et Netflix, et les propriétaires/gestionnaires des caches (Cache Owner, CO), tels que les opérateurs de réseau mobile (Mobile Network Operator, MNO) voir la figure 2.1. Les CPs détiennent une bibliothèque de contenus populaires qui sont très fréquemment demandés par des utilisateurs proches les uns des autres. Ces derniers souhaitent déplacer et stocker leurs contenus populaires à la périphérie de réseau proche de l'utilisateur final. Les CPs visent à améliorer la qualité d'expérience (Experience Quality, QoE) de leurs utilisateurs finaux en termes de temps d'accès au contenu et temps de téléchargement. De leurs côtés, les COs détiennent un espace de stockage distribué sur des caches et visent à remplir cet espace de stockage pour rentabiliser les

cachees et gagner plus de profits en louant les cachees aux CPs.

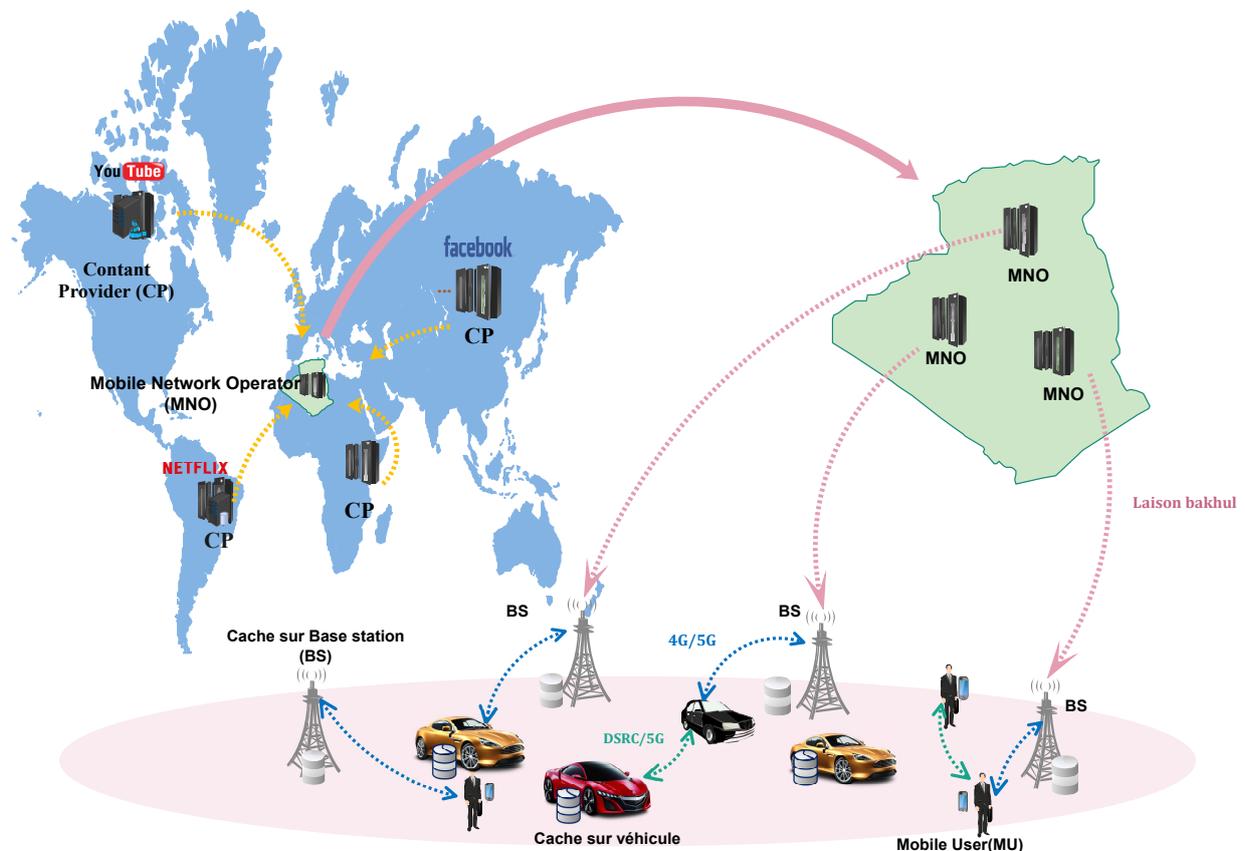


Figure 2.1: Exemple d'illustration de la technique de mise en cache de contenu (caching)

## 2.2.2 Incitation à la mise en cache

Une mise en cache réussite, nécessite la collaboration entre les différents acteurs, les fournisseurs de contenu (CPs) et les gestionnaires des cachees (COs). Pour cela, des mécanismes de mise en cache doivent être mis en place pour mener à bien cette collaboration et assurer une mise en cache efficace. En effet, les fournisseurs de contenu (CPs) possèdent des contenus populaires et ont besoin des gestionnaires des cachees, tels que les MNOs, afin de stocker leurs contenus populaires. Aussi, les COs ont besoin des CPs pour remplir et rentabiliser leurs cachees ainsi que pour alléger les backhuls de réseau cœur. Les rôles de ces acteurs dans divers scénarios de mise en cache sont souvent discutés dans la littérature [2], [36], [37] d'un point de vue commercial en focalisant les études sur les gains et les pertes de ces acteurs [38].

## 2.2.3 Apports de la mise en cache pour les réseaux de véhicules

La mise en cache des données peut améliorer considérablement l'efficacité de l'accès à l'information dans un réseau de véhicules en réduisant la latence, le temps d'accès et l'utilisation

de la bande passante. Dans les points suivants, nous citons les principaux apports de la mise en cache dans les réseaux de véhicules [39] :

- Technologie efficace pour réduire la latence de communication tout en atténuant considérablement le flux de données redondantes.
- Sauvegarde de la bande passante : la mise en cache peut réduire les coûts globaux des transferts de données à travers le réseau cœur en stockant les contenus populaires, au niveau des véhicules par exemple, proche des utilisateurs finaux et par conséquent réduire la charge de trafic sur les liens backhails de réseau cœur.
- Avec des caches déployés près de l'utilisateur final, comme sur les véhicules mobiles, l'accès aux informations et les données sera très rapide (presque instantanée).
- Améliorer le temps de réponse à la demande de contenu ou des services des véhicules pour permettre un accès plus rapide à l'information [40].
- Utiliser les communications V2V en temps réel peut être utilisés pour partager les données de mise en cache, ce qui diminue également les frais généraux de backhaul [40].
- Améliorer les performances du réseau et la qualité d'expérience des utilisateurs.

Afin d'illustrer quelques exemples de cas d'utilisations des techniques de mise en cache dans le contexte des réseaux de véhicules. Nous donnons dans la section suivante un survol bibliographique sur les principaux travaux sur l'incitation à la mise en cache.

### 2.3 Survol sur les travaux de l'incitation à la mise en cache

Les techniques de mise en cache ont attiré une attention considérable car elles peuvent réduire efficacement le trafic sur les liaisons sans fil en éliminant les transmissions de données et réduire la distance entre le contenu et l'utilisateur final. Cela nécessite le développement des mécanismes incitatifs pour motiver les acteurs à participer dans la procédure de mise en cache.

Récemment, plusieurs travaux [32, 33, 38] et [41–44] ont traité le problème de mise en cache d'une perspective commerciale en se concentrant sur la façon d'encourager les différents acteurs de réseau à participer dans l'amélioration du processus de la mise en cache.

Dans cette section nous nous intéressons principalement par les travaux qui ont étudié les systèmes d'incitation à la mise en cache dans les réseaux de véhicules. Nous effectuons une classification des travaux selon le nombre de fournisseurs de contenu populaire ainsi que sur le nombre de propriétaire des caches.

### 2.3.1 Incitation à la mise en cache monopoliste avec un seul propriétaire des caches

Dans cette sous-section, nous discutons quelques travaux de l'incitation à la mise en cache qui considèrent des politiques de mise en cache avec un seul gestionnaire de caches qui est en interaction avec plusieurs fournisseurs de contenus.

#### 2.3.1.1 Un seul fournisseur de contenu

Zou et al, dans [4] ont proposé un mécanisme d'incitation à une mise en cache des vidéos composé d'un fournisseur de vidéos (VP, video provider), un réseau d'opérateur mobile (MNO) avec un ensemble de stations de base équipées avec des mémoires caches, et plusieurs utilisateurs mobiles. Le VP vise à améliorer la QoE de ces utilisateurs en stockant les vidéos sur les caches déployés sur les stations de base de MNO. Tandis que le MNO en louant ces caches au VP, vise à gagner plus de profit financier et aussi décharger ces liens backhuls. Zou et al, ont modélisé la concurrence entre les acteurs de mise en cache par le biais d'un jeu de type Stackelberg dans le but d'améliorer la qualité d'expérience des utilisateurs.

#### 2.3.1.2 Plusieurs fournisseurs de contenu

Les études dans [45] et [41] ont proposé un mécanisme d'incitation à la mise en cache proactive dans les réseaux cellulaires à petites cellules, pour motiver les CPs à participer dans le processus de mise en cache. Ce problème a été formulé comme un jeu de type Stackelberg entre un MNO et plusieurs CPs. La concurrence entre les CPs pour l'espace de mémoire cache disponible est formulée comme un sous-jeu non-coopératif dans lequel chaque CP vise à réduire les coûts de mise en cache et à maximiser la satisfaction de ses utilisateurs. Le MNO loue ses caches sur les SBSs (Small-cell Base Stations) aux CPs et définit le prix de mise en cache pour maximiser son profit financier. Les auteurs des travaux [32] et [42–44] ont aussi essayé de proposer une approche innovante pour offrir des encouragements à la mise en cache dans les réseaux cellulaires à petites cellules d'un point de vue économique en utilisant la théorie des contrats. Dans ces modèles d'études, un MNO offre aux CPs des contrats pour les motiver à mettre en cache leur contenu dans les caches sur les petites stations de base.

Les auteurs de [3] et [46] ont proposé un autre système d'incitation à la mise en cache commerciale basé sur la théorie des contrats. La politique proposée est composée d'un fournisseur de services de réseau (Network Service Provider, NSP), plusieurs fournisseurs de contenu (CP) et plusieurs utilisateurs mobiles (Mobile users, MU). Le NSP détient le monopole du réseau et gère les caches sur les SBSs. Il loue ses ressources en termes d'espace de stockage des caches aux CPs dans le but de gagner plus de bénéfices financiers. Les CPs souhaitent louer les caches sur les SBSs afin de rapprocher leurs contenus des utilisateurs et leurs fournir de meilleurs services d'accès et de téléchargement. Dans le même cadre de la théorie des contrats, Li et al. dans [47] ont aussi proposé un modèle d'incitation à la mise en cache incitatif dans les

réseaux à petites cellules, où le NSP souhaite louer ses caches sur les SBSs aux VPs dans le but de réaliser plus de bénéfices monétaires, tandis que les VPs en déplaçant les vidéos populaires vers les caches sur les SBSs, visent à fournir des délais d'accès aux vidéos locales plus rapides et par la suite améliorer la QoE des utilisateurs.

Dans [36], un autre mécanisme de mise en cache incitatif dans les réseaux cellulaires à petites cellules (Small Cell Network, SCN) a été proposé par Zhao et al. Dans le mécanisme proposé, une SBS encourage les CPs à participer au processus de mise en cache. Un jeu de type Stackelberg en deux étapes a été formulé pour modéliser l'interaction entre les deux acteurs. Dans la première étape, la SBS décide d'abord de la politique des prix pour maximiser le profit de son MNO. Dans la deuxième étape, selon le prix de revient, chaque CP détermine la quantité de contenu populaire qu'il souhaite mettre en cache. En outre, les CPs entrent en compétition pour la capacité de stockage limitée de la SBS. Cette interaction compétitive est modélisée via un sous jeu non coopératif. Dans [33], Shen et al, ont étudié un mécanisme d'incitation à la mise en cache en utilisant un jeu de type Stackelberg où un seul MNO encourage les CPs à venir stocker leurs contenus populaires sur les caches des SBSs en leur offrant un prix de mise en cache. Le but de MNO est de remplir ces caches et par la suite gagner plus de profit monétaire. Les CPs rivalisent pour déterminer le nombre des fichiers qu'ils mettent en cache dans les SBSs de MNO afin d'améliorer la QoE de leurs utilisateurs. You et al, dans [48] ont étudié un mécanisme de négociation pour l'allocation des ressources en utilisant un jeu à enchères pour un réseau cellulaire à petites cellules entre un MNO et plusieurs CPs.

### **2.3.2 Incitation à la mise en cache concurrentielle avec plusieurs propriétaires des caches**

Dans cette sous-section, nous nous intéressons aux mécanismes d'incitation concurrentiels qui impliquent des interactions de multiples gestionnaires de caches.

#### **2.3.2.1 Un seul fournisseur de service**

Alioua et al. dans [2] ont proposé un mécanisme concurrentiel d'incitation à la mise en cache dans les réseaux d'IoV basé sur le nouveau paradigme de SDN (software defined networking). Dans ce mécanisme, un fournisseur de services qui possède un ensemble de fichiers populaires (principalement des vidéos) encourage les opérateurs mobiles cellulaires de stocker leurs fichiers populaires dans leurs caches déployés sur leurs stations de base cellulaires (SBS). Un jeu de type Stackelberg avec un seul leader et plusieurs suiveurs a été utilisé pour modéliser l'interaction entre le fournisseur de service et les opérateurs mobiles cellulaires. Le fournisseur de service vise à améliorer la QoE de ses utilisateurs, tandis que les opérateurs mobiles cellulaires entrent en compétition pour rentabiliser leurs caches et gagner plus de profit monétaire. Les auteurs de [49] et [50] ont proposé une politique d'incitation à la mise en cache pour un réseau cellulaires à petites cellules (SCN) composée de plusieurs opérateurs mobiles cel-

lulaires (MNO) et d'un seul détailleur de vidéo (vidéo retransmission, VR). Dans cette politique, les MNOs louent leurs caches sur les SBSs au VR dans le but de gagner plus de bénéfices, tandis que le VR, après avoir stocké des vidéos populaires sur les SBSs, vise à améliorer la qualité de services de leurs utilisateurs. L'interaction entre les MNOs et le VR a été modélisée à l'aide d'un jeu de type Stackelberg avec un seul leader et plusieurs suiveurs. Dans le contexte des réseaux centrés sur l'information (Information Centric Networking, ICN), Xu et al. dans [37] ont proposé une politique de mise en cache entre plusieurs fournisseurs de service d'Internet (Internet service provider, ISP) et un CP. Un modèle incitatif à la mise en cache basée sur un jeu de type de Stackelberg a été proposé, où le CP décide le prix de mise en cache de chaque contenu et les ISPs décident quel contenu mettre en cache.

### 2.3.2.2 Plusieurs fournisseurs de contenus

Dans cette partie, plusieurs fournisseurs de service cherchent à stocker leurs contenus populaires sur les caches installés sur la périphérie du réseau.

ASSILA et al. dans [51] ont proposé une nouvelle politique d'incitation à la mise en cache dans les réseaux cellulaires composé de plusieurs MNOs et plusieurs CPs. Les MNOs offrent des services de stockage payables et cherchent à inciter les CPs à venir stocker leurs fichiers populaires. Ces derniers sont en compétition permanente sur l'espace limitée des caches des MNOs. Les auteurs ont modélisés la concurrence entre les différents acteurs de système par un jeu de type Stackelberg avec multiple leaders (MNOs) et multiples suiveurs (CPs). Sur la base du jeu de type Stackelberg, un autre travail a été proposé dans [34] pour encourager la mise en cache compétitif dans les réseaux cellulaires composé de nombreux fournisseurs de services de vidéo (Video Service Provider, VSP) et de nombreux opérateurs mobiles (MNOs). Les MNOs agissent en tant que leaders qui agissent en premier après avoir estimé la stratégie des VSPs, et ces derniers agissent comme des suiveurs pour répondre aux stratégies des MNOs. Les MNOs visent à maximiser leurs bénéfices tandis que les CPs rivalisent pour augmenter le nombre des fichiers qu'ils puissent mettre en cache afin d'améliorer la QoE de leurs utilisateurs et maximiser leurs profits.

### 2.3.3 Travaux sur l'incitation à la mise en cache avec des caches mobiles

Dans cette catégorie, les contenus populaires des fournisseurs de service sont mis en caches sur des nœuds mobiles comme les téléphones et les véhicules mobiles. Un ensemble de travaux [34, 52–55] ont proposé des politiques de mise en cache sur des nœuds mobiles. Dans [34, 52–54] une politique d'incitation à la mise en cache pour les réseaux cellulaires a été proposé entre un MNO avec une seule SB et plusieurs utilisateurs mobiles (MU) en utilisant les communications de nœud à nœud (Device to Device, D2D). Le MNO motive les utilisateurs mobiles en offrant un gain monétaire pour les encourager à mettre en cache sur leurs appareils mobiles et partager le contenu avec d'autres utilisateurs en utilisant les communications D2D.

Par conséquent, les MUs entrent en compétition sur les contenus populaires de la BS pour gagner plus de profit. Ce mécanisme peut augmenter les chances de transmission D2D entre les MUs et donc réduire la charge sur la BS et libérer la bande passante. Les auteurs ont modélisé l'interaction entre la BS et les MUs en utilisant un jeu de type Stackelberg avec un leader (MNO) et plusieurs suiveurs (MUs). Les auteurs de [55] ont aussi proposé un mécanisme de mise en cache proactive pour un réseau cellulaire en utilisant les communications D2D composé d'une seule station de base et un ensemble d'équipements d'utilisateurs (User Equipment, UE). Chaque UE peut déterminer individuellement ses préférences de mise en cache (ex. volonté / intérêts, taille de la mémoire cache et état de la batterie) et signale au BS son prix unitaire de mise en cache. En tant que contrôleur central, la BS à son tour gère la diffusion du contenu pour tous les UEs en utilisant les communications D2D.

En 2020, un autre travail d'incitation à la mise en cache de contenu sur les serveurs mobiles placés en périphérie du réseau a été proposé par Chen et al. dans [56] entre un ensemble de CPs et plusieurs utilisateurs mobiles (MUs). Le but est de réduire le temps d'accès au contenu et satisfaire un grand nombre des demandes d'accès des utilisateurs en local. Dans ce système, il y a une concurrence entre les CPs sur l'espace de stockage limité des serveurs où chaque CP essaie d'augmenter son propre intérêt en maximisant le nombre de contenu populaire qui peut être mis en cache tandis que les MUs rivalisent pour gagner plus de profit. Dans ce travail les interactions entre les CPs et les MUs sont modélisées comme un jeu non coopératif. Dans un autre travail dans [35], les auteurs ont proposé une autre politique pour motiver les utilisateurs mobiles à stocker des contenus populaires sur des mémoires caches installés sur leurs équipements personnels et de distribuer ce contenu aux consommateurs mobiles à proximité en utilisant les communications D2D afin de soulager et décharger les liens de réseau cœur.

#### 2.3.4 Tableaux taxonomique et récapitulatif

Le tableau 2.1 présente un résumé récapitulatif de l'étude taxonomique des travaux de l'incitation à la mise en cache présentée précédemment. Dans ce tableau, nous classifions les travaux selon les critères suivants : l'environnement de travail, les acteurs de mise en cache (le nombre de gestionnaire des caches, le nombre de propriétaires des fichiers populaires), la mobilité de nœud qui héberge les caches et l'outil de modélisation utilisé.

Travail	Environnement	Acteurs de mise en cache		Cache mobile	Outil de modélisation
		Propriétaire de contenus	Gestionnaire de caches		
[4]	Réseaux cellulaires	Un (VP)	Un(MNO), Multiple (BS)	Non	Jeu de type Stackelberg
[33]	SCN	Multiple (CP)	Un(MNO), Multiple (SBS)	Non	Jeu de type Stackelberg
[41, 45]	SCN	Multiple (CP)	Un(MNO), Multiple(SBS)	Non	Jeu de type Stackelberg
[3, 46]	SCN	Multiple (CP)	Un(NSP), Un(SBS)	Non	Théorie des contrats
[47]	SCN	Multiple (CP)	Un(NSP), Multiple(SBS)	Non	Théorie des contrats
[32] [42-44]	SCN	Multiple (CP)	Un(MNO), Multiple (SBS)	Non	Théorie des contrats
[36]	SCN	Multiple(CP)	Multiple(SBS)	Non	Jeu de type Stackelberg
[2]	IoV	Un (CP)	Multiple(MNO), Multiple (BS)	Non	Jeu de Stackelberg
[37]	ICN	Un (CP)	Multiple (ISP)	Non	Jeu de Stackelberg
[49, 50]	SCN	Un (VR)	Multiple(MNO), Multiple (SBS)	Non	Jeu de Stackelberg
[51]	Réseaux cellulaires	Multiple (CP)	Multiple(MNO), Multiple (BS)	Non	Jeu de Stackelberg
[34]	Réseaux cellulaires	Multiple (VP)	Multiple(MNO), Multiple (BS)	Non	Jeu de Stackelberg
[52] [53] [54]	Réseaux cellulaires D2D	Multiple (MNO), Un (BS)	Multiple (MU)	Oui	Jeu de Stackelberg
[55]	Réseaux cellulaires D2D	Un (BS)	Multiple (UE)	Oui	Méthode de transformation de base
[56]	Réseaux cellulaires	Multiple (CP)	Multiple (MU)	Oui	Jeu non coopératif
Notre proposition	IoV	Un / Multiple(CPs)	Multiple (société de transport)	Oui	Jeu de Stackelberg/ Théorie des contrats

Table 2.1: Tableau récapitulatif sur les travaux de l'incitation à la mise en cache

## 2.4 Discussion

Les problèmes de l'incitation à la mise en cache sont largement étudiés dans la littérature. Cependant, les efforts accomplis jusqu'à présent n'ont pas considérés un marché de mise en cache purement réaliste et complètement concurrentiel avec plusieurs gestionnaires de caches et plusieurs prétendants à la mise en cache. La plupart des travaux soient considèrent le problème de mise en cache entre un seul propriétaire de cache et un seul [4] / plusieurs [3], [32, 33], [41–45] [36, 46–48] fournisseurs de contenu, ou entre plusieurs propriétaires de cache et un seul fournisseur de contenu [2], [37, 49, 50], ce qui ne s'applique pas forcément à la réalité des marchés de nos jours complètement compétitifs avec plusieurs fournisseurs de services (à l'instar de Netflix, YouTube et Spotify), qui cherchent à stocker leurs contenus populaires à la périphérie de réseau, et plusieurs gestionnaires de cache qui proposent le service de mise en cache. Aussi, les travaux n'ont pas considéré des politiques de mise en cache avec asymétrie d'information où les acteurs ne détiennent pas toutes les données sur le marché. En conclusion, et sur la base de la discussion et des résultats que nous avons obtenus en classant les travaux de mise en cache, les chercheurs dans ce domaine d'incitation à la mise en cache doivent travailler dans des scénarios plus réalistes sur un marché complet, en tenant compte de la situation actuelle du marché avec de nombreux fournisseurs de services, de nombreux gestionnaires de cache. En plus, il serait plus intéressant de déployer des caches sur des nœuds mobiles pour s'adapter au besoin de plus en plus croissant du trafic de données mobile et offrir le service de mise en cache partout où l'utilisateur final se déplace.

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technique de mise en cache de contenus dans la périphérie du réseau, comme une technique prometteuse pour rapprocher le contenu de l'utilisateur et améliorer leur QoE. Ensuite, nous nous sommes focalisés sur les techniques de l'incitation à la mise en cache et nous avons présenté un survol bibliographique sur les principaux travaux sur l'incitation à la mise en cache existants dans la littérature. Après, nous avons classifié ces travaux dans un tableau récapitulatif selon plusieurs critères. Nous avons terminé le chapitre par une discussion critique sur les différents travaux présentés dans le tableau taxonomique.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les concepts de base de la théorie des jeux et de la théorie des contrats, qui va nous servir pour modéliser notre contribution.

# Notions de base de la théorie des jeux et la théorie des contrats

## 3.1 Introduction

La théorie des jeux fut fondée par Von Neumann et Morgenstern en 1944 lors de la parution de leur ouvrage «Theory of Games and Economic Behavior » [57]. Cette théorie prend comme hypothèse principale la rationalité forte des individus. La théorie des jeux essaie d’approcher d’une manière mathématique et logique le comportement stratégique d’un joueur dans des situations où le succès individuel dépend de ses propres choix et des choix de ses adversaires. Elle analyse les réactions d’individus face à des états d’opposition et cherche à mettre en évidence des stratégies optimales [58]. Depuis, la théorie des jeux a connu un développement mathématique important et de nombreuses applications dans diverses disciplines : la biologie, la psychologie, l’économie, la sociologie, la sécurité et les réseaux informatiques, etc. [59]

Dans ce troisième chapitre, nous abordons la théorie des jeux. Au début, nous commençons par la définition et les notions fondamentales de la théorie des jeux en définissant les grands concepts (typologie, formalisme de modélisation, exemple de cas d’application). Puis, nous continuons par présenter les détails des jeux séquentiels et leurs différentes caractéristiques. Ensuite nous décrivons les concepts fondamentaux de la théorie des contrats. Finalement, nous terminons le chapitre par une conclusion.

## 3.2 Définition de la théorie des jeux

La théorie des jeux ou la théorie de décision peut être définie comme l’étude mathématique des **interactions stratégiques** entre plusieurs agents **rationnels**. Les mots importants dans cette définition sont [60] :

- **Interaction** : il y a plusieurs agents (appelés aussi joueurs, "decision makers", etc.) qui interagissent, le contentement (appelé aussi paiement, gain, utilité, etc.) de chacun ne dépend pas que de lui, mais aussi en partie des autres.
- **Stratégique** : les joueurs ont le choix entre plusieurs options.
- **Rationnel** : un joueur ne joue pas n'importe comment, il cherche à optimiser son paiement (son intérêt).

### 3.3 Concept de base de la théorie des jeux

La théorie des jeux se base principalement sur quatre notions fondamentales. Dans cette section, nous présentons les détails de ces notions de base.

#### 3.3.1 Joueurs

Un joueur est une entité de base dans un jeu, qui participe au jeu avec un ensemble fini de joueurs désignés par  $N$  et qui est chargé de prendre des mesures (actions) rationnelles désignées par  $A_i$ , pour chaque joueur  $i$ . Un joueur peut représenter une personne, une machine ou un groupe de personnes dans un jeu [61].

#### 3.3.2 Stratégie (action/choix)

C'est un plan d'actions ou de choix complet d'un joueur dans n'importe quelle situation pouvant survenir au cours du jeu, en spécifiant ce que fera ce dernier à chaque étape [62]. La stratégie décrit totalement le comportement d'un joueur.

Il existe plusieurs types de stratégies. Une stratégie pure est une action, ou un plan d'actions, qui est choisie par chaque joueur avec certitude. Cette notion a été étendue à celle de stratégie mixte définie comme une distribution de probabilité sur l'ensemble des stratégies pures [62].

#### 3.3.3 Utilité

L'utilité traduit les préférences (la satisfaction ou le gain) d'un joueur dans une situation ou une action donnée [63]. La fonction d'utilité, notée  $u_i$  tel que  $u_i : S_i \times \dots \times S_n \rightarrow \mathbb{R}$ , est l'outil mathématique qui à chaque ensemble de stratégies associe les gains du joueur  $i$ , tel que  $S_i$  : l'ensemble des stratégies (actions) de joueur  $i$  et  $n$  : le nombre des joueurs.

### 3.3.4 Equilibre de Nash

Dans cette sous-section, nous expliquons c'est quoi l'équilibre de Nash, en commençant par sa définition formelle. Ensuite nous parcourons les propriétés de cet équilibre. Enfin, nous expliquons comment déduire l'équilibre de Nash à travers un exemple illustratif.

#### 3.3.4.1 Définition

«Un équilibre de Nash correspond à une situation d'équilibre où aucun joueur n'a intérêt à dévier unilatéralement de cette situation » [64]. Un équilibre de Nash est un profil de stratégies  $s = \{s_1, \dots, s_n\}$  tel que pour tout joueur  $i$  et toute stratégie  $s' \in S_i$  [65] :

$$u_i(s_i, s_{-i}) \geq u_i(s'_i, s_{-i}) \quad (1)$$

#### 3.3.4.2 Propriétés

- (1) Un profil (unique) obtenu par élimination itérative des stratégies (strictement) dominées<sup>1</sup> est un équilibre de Nash (et c'est le seul équilibre du jeu).
- (2) Un jeu (en stratégies pures<sup>2</sup>) peut avoir plusieurs équilibres de Nash, mais il peut aussi n'en avoir aucun.
- (3) Deux équilibres de Nash  $s = (s_i, s_{-i})$  et  $s' = (s'_i, s'_{-i})$  sont *interchangeables* si pour tout  $i$   $(s_i, s'_{-i})$  et  $(s'_i, s_{-i})$  sont aussi des équilibres de Nash.
- (4) Deux équilibres de Nash  $s$  et  $s'$  sont équivalents s'ils donnent la même utilité à tous les joueurs.

#### 3.3.4.3 Fonction de meilleure réponse

La fonction de meilleure réponse du joueur  $i$  est la fonction  $B_i$  qui associe à chaque combinaison de stratégies des autres joueurs  $s_{-i}$  les stratégies du joueur  $i$  qui maximise son utilité [65]:

$$B_i(s_{-i}) = \{s_i \in S_i \text{ t.q. } u_i(s_i, s_{-i}) \geq u_i(s'_i, s_{-i}) \text{ pour tout } s'_i \in S_i\} \quad (2)$$

<sup>1</sup>Une stratégie dominée est une stratégie qui génère le pire résultat dans tous les cas. Une stratégie  $s_i$  est (strictement) dominée pour le joueur  $i$  s'il existe une stratégie  $s'_i$  telle que pour tous les profils  $s_{-i}$  tel que  $\forall s_{-i} \in S_{-i} : u_i(s'_i, s_{-i}) > u_i(s_i, s_{-i})$

<sup>2</sup>Une **stratégie pure** du joueur  $i$  est l'action qu'il choisit à chaque fois qu'il est susceptible de jouer, c'est-à-dire, toutes les options possibles qu'a le joueur. On note par  $X_i$ , l'ensemble de toutes les stratégies pures du joueur  $i$  avec  $i \in \overline{1, 2}$ . Et  $x_i$  un élément de  $X_i$  tel que  $|X_i| = n_i$ .

### 3.3.5 Exemple d'illustration : le dilemme du prisonnier

Afin d'illustrer la notion de la théorie des jeux, nous présentons comme exemple le problème du dilemme du prisonnier.

#### Le dilemme du prisonnier

« Deux suspects d'un crime majeur sont détenus dans des cellules séparées. La police a assez de preuves pour condamner chacun d'entre eux pour des crimes mineurs mais pas assez pour les condamner pour le crime majeur, à moins que l'un d'entre deux ne dénonce l'autre. Si les deux suspects se taisent, ils seront chacun condamnés à un an de prison. Si seulement l'un d'entre eux dénonce l'autre, il sera libéré et utilisé en tant que témoin contre l'autre qui écoperà de 10 ans de prison. Enfin si les deux dénoncent, ils passeront chacun 5 ans en prison ». [66]

Autrement dit, on a deux prisonniers (P1 et P2) avec deux choix à faire (deux actions possibles) Se taire, Dénoncer.

- Si le choix des deux prisonniers est égal à Dénoncer, Dénoncer, ils vont en prison pour 5 ans chacun.
- Si l'un des deux est dénoncé et pas l'autre (i.e., Se taire, Dénoncer, Dénoncer, Se taire), celui qui a dénoncé sort libre et l'autre va en prison pour 10 ans.
- Si les deux suspects se taisent, ils vont en prison pour un an tous les deux.

On peut modéliser ce problème à l'aide d'un jeu tel que :

- Les joueurs : les deux prisonniers (prisonnier 1 (P1) et prisonnier 2 (P2)).
- Les stratégies : chaque joueur a le choix entre deux stratégies : se taire (T) ou dénoncer (D).
- L'utilité : le gain  $u_i$  obtenu est lié au choix/action fait par chaque joueur  $P_i$  (donc les valeurs possibles pour chaque ensemble  $u_i$  égale à  $2^2$ ), Avec  $i = \overline{1, 2}$ :

– Les gains  $u_1$  de joueur  $P_1$  :

$$u_1(\text{Se taire, Dénoncer}) = 0, u_1(\text{Se taire, Se taire}) = 1$$

$$u_1(\text{Dénoncer, Dénoncer}) = -5 \text{ et } u_1(\text{Dénoncer, Se taire}) = -10.$$

– Et de manière similaire, les gains  $u_2$  de joueur  $P_2$  :

$$u_2(\text{Se taire, Dénoncer}) = 0, u_2(\text{Se taire, Se taire}) = 1$$

$$u_2(\text{Dénoncer, Dénoncer}) = -5 \text{ et } u_2(\text{Dénoncer, Se taire}) = -10.$$

		Prisonnier 2	
		Se traire	Dénoncer
Prisonnier 1	Se traire	(-1,-1)	(-10,0)
	Dénoncer	(0,-10)	(-5,-5)

Table 3.1: Exemple des gains pour le jeu « Dilemme du prisonnier »

Le tableau 3.1 montre les gains que les deux joueurs peuvent obtenir en mettant en œuvre tout choix possible.

Afin de résoudre ce jeu, et atteindre l'équilibre de Nash (la meilleure situation pour les deux joueurs), nous procédons à une élimination itérative des stratégies jusqu'à ce que nous arrivions à la meilleure stratégie. En d'autres termes le joueur prend ses décisions en tenant compte des actions antérieures de l'autre joueur. Nous commencerons par le joueur 2, Si  $P2$  prend le choix « **se traire** », il obtiendra soit  $-1$  ou  $-10$ , et s'il choisit de « **Dénoncer** », il obtiendra soit  $0$  ou  $-5$ . Comme le  $P2$  est rationnel, il choisira de dénoncer, car  $0$  est la meilleure stratégie pour lui (voir l'étape (3.2a) dans la table 3.2), et éliminer par suite les autres actions arrivent par le choix « **se traire** » (l'étape (3.2b) dans la table 3.2). Basé sur la décision de  $P2$ ,  $P1$  choisit de parmi les stratégies restantes  $\{(-5)$  s'il dénonce,  $(-10)$  s'il se taise  $\}$  (voir l'étape (3.2c) la table 3.2). Même résultat obtenu si l'on commence par les actions de  $P1$ . Donc **Dénoncer, Dénoncer** est le seul équilibre de Nash dans ce jeu, car c'est l'ensemble des stratégies qui maximisent l'utilité de chaque prisonnier par rapport à la stratégie de l'autre, (ils vont en prison pour 5 ans tous les deux) .

(-1,-1)	(-10,0)
(0,-10)	(-5,-5)

(a)

<del>(-1,-1)</del>	(-10,0)
<del>(0,-10)</del>	(-5,-5)

(b)

<del>(-1,-1)</del>	<del>(-10,0)</del>
<del>(0,-10)</del>	(-5,-5)

(c)

Table 3.2: Les étapes pour atteindre l'équilibre de Nash du jeu « Dilemme du prisonnier »

### 3.4 Domaine d'application de la théorie des jeux

La théorie des jeux est fréquemment utilisée dans différents domaines. Nous citons quelques exemples de ces domaines dans les points suivants :

- **L'économie** : la théorie des jeux est très utilisée pour analyser la concurrence entre les entreprises en situation d'oligopole [63].
- **Les sciences sociales** : la théorie des jeux est utilisée aussi pour analyser le comportement des populations humaines.
- **Les sciences politiques** : la théorie des jeux est un outil efficace dans les mains de diplomates et politiciens pour analyser toute situation de conflit entre les particuliers, les

entreprises, les états, les partis politiques, etc. [67]

- **La biologie** : les interactions entre individus ayant des stratégies concurrentes ou identiques peuvent être traitées comme des jeux avec plusieurs joueurs [68].
- **La sécurité des systèmes informatiques** : la théorie des jeux permet d'anticiper les actions des pirates et elle est donc utilisée pour la sécurité et la confidentialité du cyberspace.
- **Les réseaux informatiques** : la théorie des jeux a été largement utilisée dans la recherche sur les réseaux sans fil pour développer la compréhension des points de fonctionnement stables pour les réseaux constitués de nœuds autonomes / égoïstes. Les nœuds sont considérés comme les joueurs. Les fonctions d'utilités sont souvent choisies pour correspondre au taux de connexion atteint ou à des mesures techniques similaires. Le but est d'améliorer les performances du réseau, l'efficacité énergétique et de minimiser les coûts [69].
- etc.

### 3.5 Typologie des jeux

Les jeux sont divisés en différentes catégories en fonction de différents critères. Dans cette section, nous fournissons un bref aperçu des différentes classifications des jeux :

- **Jeux à somme nulle / Jeux à somme non nulle** : la catégorie des jeux à somme nulle englobe tous les jeux où la somme algébrique des gains des joueurs est nulle (c.-à-d. la somme des gains totaux et des pertes totales donne 0). Le gain d'utilité d'un joueur résulte des pertes équivalentes d'un autre joueur [58], [70]. Nous citons comme exemple : *le jeu de pile ou face*.
- **Jeux à information complète / Jeux à information incomplète** : dans un jeu, si chaque joueur connaît la structure du jeu, c'est-à-dire : les règles du jeu, l'ensemble des stratégies possibles de chaque joueur et le paiement (l'utilité) de chaque joueur à chacune des issues possibles du jeu ; le jeu est appelé *jeu à information complète*. Si au moins un joueur n'a pas d'informations sur un élément de la structure du jeu, (Par exemple, le joueur  $i$  ne connaît pas la fonction de gain du joueur  $k$ ) on est dans un *jeu à information incomplète* [70]. Par exemple: dans le jeu d'échecs, dames ou de Go : l'information est complète. Par contre dans le poker et les dominos sont des jeux à information incomplète.
- **Jeux coopératifs / Jeux non coopératifs** : un jeu est dit coopératif lorsque les joueurs peuvent collaborer entre eux et passer des accords. Ils peuvent être alors divisés en groupes ayant les mêmes avantages, appelés coalitions et recherchent l'intérêt général suivi d'un partage des gains entre tous les joueurs [71]. En revanche, dans les jeux non

coopératifs, chaque joueur agit égoïstement et cherche sa meilleure décision afin de maximiser son propre gain. La solution du jeu est équivalente à un problème d'optimisation conjointe, où chaque joueur essaie d'optimiser son propre utilité [70].

- **Jeux à deux joueurs / Jeux à  $n$  joueurs** : si le jeu est composé de deux joueurs on est dans un jeu à deux joueurs (exemple. les jeux de plateau (échecs, dames, etc.)), si le nombre de joueurs d'un jeu dépasse deux, le jeu est à  $N$  joueurs (exemple : le jeu de football).
- **Jeux finis / Jeux infinis** : «un jeu est dit fini si l'ensemble des stratégies de chacun des joueurs est fini » [72] (exemple : le jeu de Pierre-papier-ciseaux, le jeu de cartes, etc.). Par contre dans les jeux infinis l'ensemble des stratégies est infini comme dans le basketball ou le tennis.
- **Jeux simultanés / jeux séquentiels** : dans les jeux *simultanés*, les décisions sont prises une fois et en même temps par tous les joueurs ; autrement dit, les joueurs prennent leurs décisions sans pouvoir observer les actions des autres (exemple : le jeu de boxe, le dilemme de prisonnier, etc.). Au contraire dans un jeu *séquentiel*, les joueurs prennent des décisions un après l'autre avec un ordre prédéfini, et au moins certains joueurs peuvent observer les actions des précédents joueurs comme dans le jeu d'échecs ou le jeu de go [70].
- **Jeux répétés / Jeux à coups unique** : si une partie n'est jouée qu'une seule fois où tous les joueurs choisissent leur unique coup simultanément et que les joueurs reçoivent leurs gains à la fin de tour comme dans le jeu de pile ou face, le jeu est appelé jeu à coups unique. Par contre, si le jeu se répète pendant plusieurs tours, et les joueurs sont payés à la fin de chaque tour comme dans le jeu de cartes, le jeu est appelé *répété* [58], [70].

## 3.6 Modélisation des jeux

Il existe deux modèles de représentation des jeux, la représentation extensive et la représentation stratégique (ou normale). Dans cette section, nous présentons les deux modèles avec des exemples d'illustrations.

### 3.6.1 Jeux sous forme extensive (arbre de Kuhn)

La modélisation sous forme extensive est un des moyens les plus simples pour représenter un jeu [66]. Il décrit de manière précise les règles de déroulement du jeu : qui joue, quand, quels sont ses choix et quelle est son information jusqu'au moment où le jeu est déclaré fini.

### 3.6.1.1 Définition usuelle

La forme extensive du jeu est généralement représentée à l'aide d'un arbre appelé arbre de Kuhn (un arbre : est un graphe connexe sans cycle). Cet arbre décrit comment le jeu est joué, afin de spécifier : l'ensemble des joueurs, dans quel ordre ils jouent, les différentes actions qu'ils peuvent choisir, ce qu'ils savent au moment de jouer et les paiements pour toutes les issues possibles du jeu.

Plus précisément, comme il est illustré dans la figure 3.1, chaque nœud ou sommet de l'arbre spécifie le (les) joueur(s) qui fait son choix, donc le nœud racine est représenté le premier joueur qui commence le jeu et chaque arc représente chacune des actions (choix) que ce joueur peut prendre à ce point du jeu, les gains que chaque joueur peut réaliser après avoir suivi un des chemins possibles au sein de l'arbre sont donnés aux sommets terminaux [58], [66].

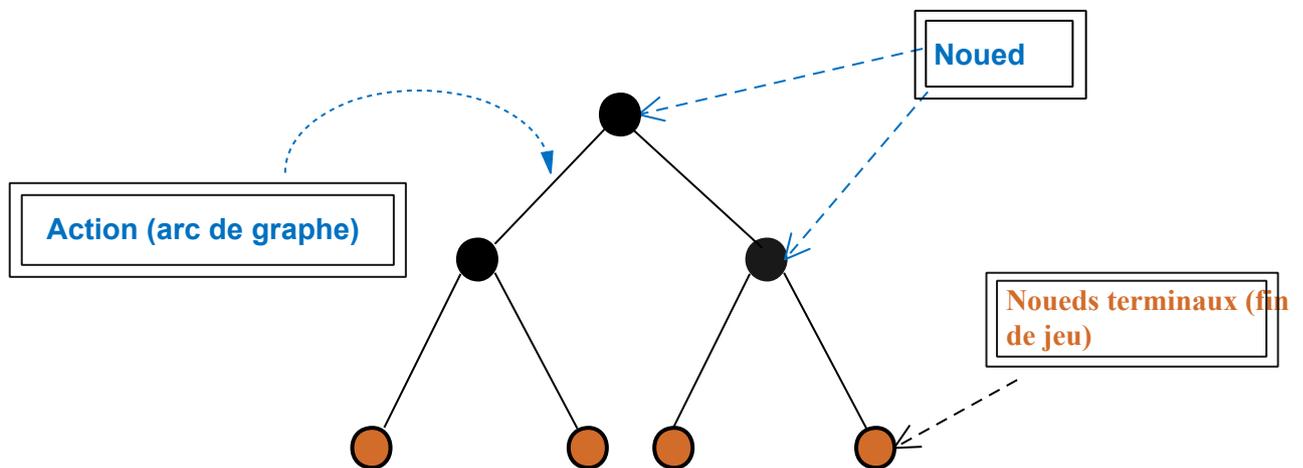


Figure 3.1: La représentation de jeu sous forme extensive (arbre de Kuhn)

### 3.6.1.2 Définition mathématique

Un jeu sous forme extensive  $\Gamma$  est donnée par [73]:

- $I$  ensemble fini de joueurs,  $N \notin I$  (nature),
- $T$  ensemble fini de nœuds,  $Z \subset T$  nœuds terminaux, et pour  $t \notin Z$  :
  - Le joueur ou la nature  $i(t) \in \{N\} \cup I$  qui joue en  $t$ ,
  - L'ensemble de choix possibles  $A(t)$ ,
  - Le nœud successeur résultant du choix  $a, N(t, a)$ ,
  - Une distribution  $D(t)$  sur  $A(t)$  si  $i(t) = N$ .
- $u_i : Z \rightarrow \mathbb{R}$  fonctions d'utilité de  $i$  ;

- $h(t)$  classe d'équivalence de  $t$  pour l'information :

$$x' \in h(x) \Rightarrow i(x'), A(x') = A(x), h(x') = h(x)$$

Afin que le jeu ait une structure d'arbre, on requiert que les éléments vérifient les propriétés suivantes :

- $s(t) = \{N(t, a), a \in A(t)\}$  ensemble des successeurs directs de  $t$ . ( $\emptyset$  si  $t \in Z$ ),
- $S(t) = s(t) \cup s(s(t)) \cup s(s(s(t)))$ . tous les successeurs de  $t$  ;
- Il n'y a pas de cycle :  $\forall t, t \notin S(t)$  ,
- Nœud initial  $\exists \tilde{t}, S(\tilde{t}) \cup \{\tilde{t}\} = T$  ,
- Chaque nœud non initial a un unique prédécesseur :  $\forall \tilde{t} \neq t, \exists ! \tilde{t}, t \in s(t')$ .

### 3.6.1.3 Exemple d'illustration : le dilemme du prisonnier

Dans cet exemple, nous prendrons l'exemple du jeu « dilemme du prisonnier » décrit dans la sous-section 3.3.5, la forme extensive de ce jeu est illustrée dans la figure 3.2

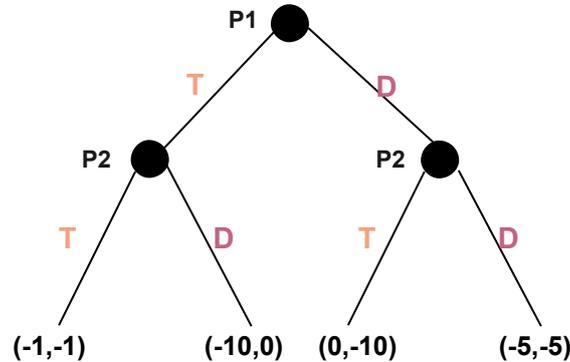


Figure 3.2: Forme extensive du jeu "Le dilemme du prisonnier"

- Le premier nœud de cet arbre représente la décision du premier joueur ( $P1$ ).
- A la suite de chacun de ses choix (se taire ( $T$ ) ou dénoncer ( $D$ )), la possibilité est donnée au joueur suivant ( $P2$ ) d'effectuer son choix.
- Une fois que les deux joueurs ( $P1, P2$ ) ont pris leurs décisions, on arrive à un résultat du jeu auquel les gains correspondants sont associés.

### 3.6.2 Jeux sous forme stratégique (ou normale)

Lorsque le jeu est simultané, la représentation par la forme extensive devient particulièrement lourde et plus compliquée. La forme stratégique (ou normale) est une façon pratique de présenter les gains (ou utilités) et les stratégies de chaque joueur [74]. En revanche, dans le cadre des jeux en forme stratégique, les joueurs peuvent choisir leurs actions de manière simultanée sans connaître le choix des autres et le jeu est décrit sous la forme d'une matrice.

#### 3.6.2.1 Définition Mathématique

Un jeu sous forme normale peut être représenté sous la forme [64] :

$$\langle N, \{X_i\}_{i \in N}, \{u_i\}_{i \in N} \rangle$$

Où :

1.  $N = \{1, 2, \dots, N\}$  est l'ensemble des joueurs,
2.  $X_i \subset \mathbb{R}_{n_i}$  désigne l'ensemble des stratégies du joueur  $i \in N$ ,  $X = \prod_{i=1}^N X_i$  est l'ensemble des issues du jeu,
3.  $u_i : X \rightarrow \mathbb{R}$  est la fonction gain du  $i^{eme}$  joueur.

#### 3.6.2.2 Représentation

Dans les jeux sous forme normale, l'ensemble des gains possibles qui peuvent être remportés par les joueurs, est représenté par une matrice à m lignes et n colonnes, où m et n sont le nombre de stratégies à la portée du joueur, représentées respectivement en ligne et en colonne. Pour un jeu à deux joueurs, le fonctionnement est relativement simple : le premier joueur choisit ses actions à partir des lignes et le second joueur choisit ses actions à partir des colonnes. Le choix fait en commun, détermine les gains de chaque joueur en fonction de la matrice jouée [75].

Le plus connu des jeux sous forme stratégique est *le dilemme du prisonnier*. Nous avons déjà parlé des détails de ce jeu dans la sous-section 3.3.5. Il est usuel de représenter le jeu fini à deux joueurs sous forme stratégique du dilemme du prisonnier par le tableau des gains. Le jeu peut alors être représenté comme suit :

La Table 3.3 représente sous forme matricielle le jeu du dilemme du prisonnier, avec deux joueurs (Prisonnier 1 et Prisonnier 2), chacun ayant deux actions 'Se taire 'et 'Dénoncer '. Par convention les gains sont représentés sous la forme  $(x, y)$ , où  $x$  est le gain du joueur ligne (Prisonnier 1) et  $y$  est le gain du joueur colonne (Prisonnier 2) (*où le gain est égal au nombre d'années de condamnation à la prison*). Si le premier joueur choisit la première ligne et que

		Prisonnier 2	
		Se traire	Dénoncer
Prisonnier 1	Se traire	(-1,-1)	(-10,0)
	Dénoncer	(0,-10)	(-5,-5)

Table 3.3: La représentation stratégique du jeu du « dilemme du prisonnier »

le second choisit la deuxième colonne, alors ils auront respectivement les gains  $x_{12} = -10$  et  $y_{12} = 0$ .

### 3.7 Jeux Séquentiels

Dans cette section, nous détaillons les jeux séquentiels. Nous commençons par la définition et les caractéristiques principales de ces jeux en donnant un exemple pour une meilleure compréhension. Ensuite, nous expliquons la notion de sous-jeu et comment déduire l'équilibre de Nash et la technique de déduction à rebours dans ce type de jeux.

#### 3.7.1 Définition

“Un jeu séquentiel est un jeu où les joueurs se déplacent les uns après les autres. En disposant à chaque fois de l'information sur le coup adverse, en d'autres mots chaque protagoniste connaît l'historique du jeu et l'action de l'adversaire au moment de formuler son choix ” [58].

“Les jeux séquentiels sont constitués mêmes éléments qu'un jeu normal : les joueurs, les stratégies et les gains. Cependant, les jeux séquentiels ont l'élément supplémentaire que l'historique du jeu est important car les joueurs peuvent prendre des décisions conditionnelles à ce qu'ont joué les autres joueurs précédemment ” [76].

#### 3.7.2 Caractéristiques

Un jeu séquentiel se caractérise par [76] :

- Un ensemble de joueurs.
- Un déroulement, l'information et les actions à disposition de chaque joueur au moment où il joue.
- Le paiement à la fin du jeu, qui dépend de l'historique du jeu.

### 3.7.3 Exemple d'illustration : le pilote et le terroriste

Un terroriste monte sur un avion, après 10 Km de vol, le terroriste ( $T$ ) menace le pilote ( $P$ ) de faire exploser l'avion s'il n'atterrit pas à la ville  $V1$ . Donc, le pilote a le choix entre la décision ( $V2$ ) qui consiste à continuer le vol vers la ville  $V2$  et la décision ( $V1$ ) de suivre la direction de la ville  $V1$ . Ainsi, l'ensemble  $X_p$  des décisions du pilote est :  $X_p = \{V_1, V_2\}$ .

Après avoir observé les choix possibles du pilote, le terroriste a le choix entre faire exploser la bombe ( $B$ ) ou abandonner ( $N$ ). D'où l'ensemble  $X_t$  des décisions du terroriste est  $X_t = \{B, N\}$ . Les fonctions de gain du pilote et du terroriste sont respectivement :

$$u_p : X_p \times X_t \rightarrow \mathbb{R}$$

$$u_t : X_p \times X_t \rightarrow \mathbb{R}$$

On note par  $S(i)$  la stratégie du joueur ( $i$ ), avec  $i \in \{p, t\}$ , on a :

$$(S_p, S_t) = (u_p(S_p, S_t), u_t(S_p, S_t)) = \begin{cases} (2, 0) & \text{si } S_t = N, S_p = V_2 ; \\ (-1, 1) & \text{si } S_t = B, \forall S_p ; \\ (1, 1) & \text{si } S_t = V_1, S_p = N ; \end{cases} \quad (3)$$

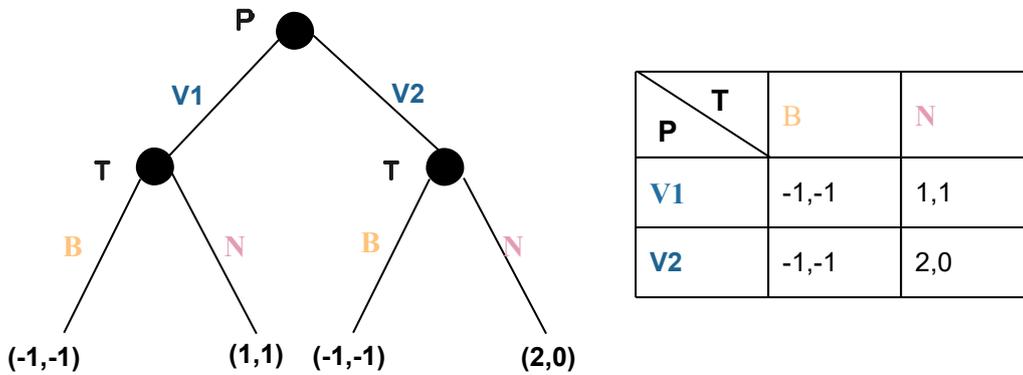


Figure 3.3: Exemple d'un jeu séquentiel sous forme extensive/stratégique

Nous prendrons ce jeu, si les joueurs  $P$  et  $T$  participent à une séquence de jeu, le joueur 1 à deux actions possibles  $V1$  et  $V2$ , et le joueur  $T$  après remarque son travail, décide d'aller à gauche ou à droite. L'arbre du jeu et la matrice des gains sont représentés dans la figure 3.3.

### 3.7.4 Stratégie dominante / stratégie dominé

Les notions de stratégies dominantes et de stratégies dominées sont des concepts importants en théorie des jeux.

### 3.7.4.1 Stratégie dominante

“Une stratégie dominante est une stratégie optimale quelle que soit la stratégie de l’autre joueur. Une stratégie dominante donne toujours un gain supérieur ou égal au gain qu’il peut attendre de toutes les autres stratégies ” [77]. C’est-à-dire qu’elle donne toujours le meilleur résultat.

Plus précisément, la stratégie  $(S_i)$  du joueur  $i$  est dominante si et seulement si quel que soit le comportement des autres joueurs, la stratégie  $(S_i)$  apporte strictement plus de gain que les autres stratégies du joueur  $i$  [72].

$$u_i(s'_i, s_{-i}) \geq u_i(s_i, s_{-i}) \forall s_{-i} \in S_{-i}, \forall s_i \in S_i \quad [78] \quad (4)$$

### 3.7.4.2 Stratégie dominée

Une stratégie dominée est une stratégie qui génère le pire résultat dans tous les cas. Elle donne toujours un gain inférieur à celui d’au moins une des autres stratégies à sa disposition. La stratégie  $(S_i)$  du joueur  $i$  est strictement dominée par la stratégie  $(S'_i)$  si et seulement si, quel que soit les actions des autres joueurs, le joueur  $i$  obtient avec  $(S_i)$  un gain inférieure à celui obtenu avec  $(S'_i)$  [72], [77].

$$u_i(s'_i, s_{-i}) > u_i(s_i, s_{-i}) \forall s_{-i} \in S_{-i} \quad [78] \quad (5)$$

### 3.7.5 Notion de sous-jeu

Un sous-jeu est une partie d’un jeu qui est elle-même un arbre, formé de nœuds dont un nœud initial et toutes les branches qui en sont issues. Cette partie peut être étudiée séparément du jeu dans son entièreté [66].

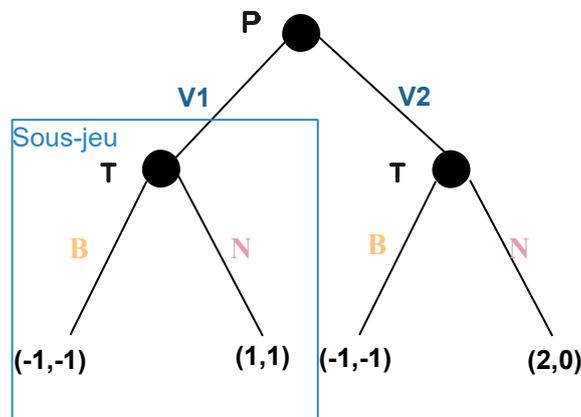


Figure 3.4: Un sous-jeu d’exemple précédant « le pilote et le terroriste »

Selon la figure 3.4. Un sous-jeu est déterminé à partir d'où moins un nœud, deux branches et un ensemble d'information formant ainsi un petit jeu sous forme extensive appartenant à un jeu plus grand.

### 3.7.6 Equilibre de Nash et la notion de déduction à rebours (rebours induction)

Les jeux dynamiques peuvent admettre un grand nombre d'équilibres de Nash, et parmi eux, des équilibres incluant des décisions. Le problème découle du fait qu'un équilibre de Nash garantit seulement des décisions rationnelles aux nœuds situés sur le chemin d'équilibre.

Par définition, un jeu est dynamique lorsque son déroulement procure de l'information à au moins un joueur. Ce type de jeu peut être résolu de façon satisfaisante au moyen de l'équilibre de Nash à condition de l'accompagner d'une condition supplémentaire dénommée «critère de perfection »(on parle précisément d'équilibre de Nash parfait en sous-jeux) [79].

Il s'agit de la résolution par induction à rebours, également appelée algorithme de Kuhn. Cet algorithme conduit toujours à identifier un équilibre de Nash satisfaisant la condition de rationalité séquentielle.

L'algorithme est le suivant : “commencer à partir de la fin de jeu, en un nœud prédécesseur d'un nœud terminal. Imaginer que le déroulement du jeu conduise à ce point. On peut anticiper que le joueur en question, jouera de manière optimale et choisira l'action (on suppose ici qu'il n'y a pas d'indifférence pour simplifier) qui maximise son gain. On peut donc effacer les autres actions issues de ce nœud. Le comportement devient d'une certaine manière totalement prévisible et on peut remplacer le nœud en question par le nœud terminal (avec les paiements correspondant) associé à l'action optimale. On recommence la procédure d'analyse pour les autres nœuds qui précèdent immédiatement les nœuds terminaux.

A chaque étape de l'algorithme, l'arbre est (strictement) réduit. Si l'on répète l'opération on débouche nécessairement sur le nœud initial. Le jeu est réduit à un problème de décision simple du premier joueur ” [66]. Cette méthode repose sur l'hypothèse de *connaissance commune de la rationalité* [79].

On applique la méthode de déduction à rebours sur l'exemple suivant (figure 3.5) : [79]

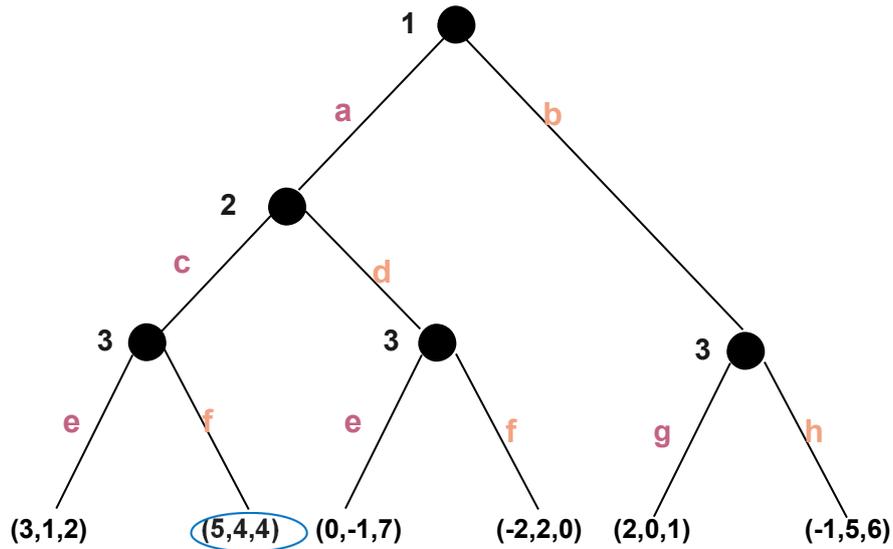


Figure 3.5: Exemple sur la méthode de déduction à rebours

On l'obtient en raisonnant comme suit : au dernier coup,

- (1) Si le joueur 3 est rationnel, il jouera  $y$  s'il observe que le joueur 1 joue  $b$  (car  $6 > 1$ ),  $f$  s'il observe que le joueur 1 joue  $a$  et le joueur 2 joue  $c$  (car  $4 > 2$ ), et  $e$  s'il observe que le joueur 1 joue  $a$  et le joueur 2 joue  $d$  (car  $7 > 0$ ).
- (2) Si le joueur 2 sait que le joueur 3 est rationnel, le joueur 2 sait qu'il obtiendra 4 en jouant  $c$ , et  $-1$  en jouant  $d$ . S'il est rationnel, le joueur 2 jouera donc  $c$  (car  $4 > -1$ ).
- (3) Si le joueur 1, sait que les joueurs 2 et 3 sont rationnels, le joueur 1 sait qu'il obtiendra  $-1$  en jouant  $b$ , et  $5$  en jouant  $a$ . S'il est rationnel, le joueur 1 jouera donc  $a$  (car  $5 > -1$ ).

L'équilibre de Nash parfait est donc  $\{a, c, f\}$  et les paiements sont  $\{5, 4, 4\}$ .

### Autre exemple de jeu séquentiel (le jeu de Stackelberg)

Le jeu Stackelberg est une classe de jeux séquentiels non coopératifs, dans lesquels un joueur a une priorité plus élevée, appelé un *leader*. Les autres utilisateurs sont appelés *suiveurs*. Le leader a la capacité de faire appliquer sa stratégie sur les suiveurs, dans un jeu de Stackelberg, le leader déclare d'abord une stratégie, puis les suiveurs réagissent rationnellement à l'action du leader [61].

## 3.8 Théorie des contrats

Dans cette section, nous décrirons les concepts fondamentaux de la théorie des contrats. Nous commençons par donner la définition de la théorie des contrats et présenter l'utilisation de cette théorie dans les mécanismes d'incitation. Nous abordons par la suite leur types. Puis nous donnons les composants clés pour la conception de contrat dans le contexte des réseaux sans fils.

### 3.8.1 Définition

La théorie des contrats est une théorie économique qui décrit la manière dont les parties prenantes peuvent développer un accord juridique dans une situation impliquant une information asymétrique. Dans un scénario d'information asymétrique, la partie principale ne connaît pas exactement les caractéristiques des autres parties. La théorie du contrat analyse la manière dont les parties prennent des décisions à un accord et conviennent de conditions particulières en cas d'imprévu. Elle s'appuie sur des principes de comportement économique, car les différentes entités ont des motivations différentes pour exécuter ou ne pas exécuter certaines actions [80], [81].

### 3.8.2 Théorie des contrats pour les mécanismes d'incitation

La théorie des contrats est un outil puissant utilisé pour modéliser des accords contractuels entre deux entités aux intérêts différents et interdépendants [82]. En utilisant la théorie des contrats, un employeur peut inciter plus efficacement son employé en lui proposant un ensemble de contrats avec une récompense pour chaque performance atteinte [80], [83].

Plus précisément, la théorie des contrats permet d'étudier l'interaction entre les employeurs et les employés. Les performances des employés ont tendance à être meilleures lorsqu'ils travaillent plus durs, et la probabilité d'une mauvaise performance sera plus faible si les employés sont plus dévoués ou se concentrent sur le travail. En revanche, si la rémunération d'un employé est indépendante de ses performances, il sera moins probable que l'employé fasse des efforts dans son travail. La conception du mécanisme d'incitation joue un rôle important dans la résolution du problème des incitations des employés. En théorie des contrats, la solution obtenue est un menu de contrats pour les employés. Habituellement, l'objectif est de maximiser l'utilité ou le rendement de l'employé s'il se comporte de façon honnête, ce problème est formulé comme une maximisation de la fonction d'utilité d'employeur, sous réserve de la contrainte, qui est la compatibilité des incitations, afin que l'utilité de l'employé puisse être maximisée lors de la signature du contrat envisagé avec sa véritable préférence, et la contrainte, qui est la rationalité individuelle, de sorte que l'utilité de l'employé dans le cadre de ce contrat est plus grande, *i.e.*, supérieur ou égal à son utilité réservée lorsqu'il ne participe pas [80].

### 3.8.3 Types de théorie des contrats

Dans la pratique, la théorie des contrats se divise en trois modèles ou types. Ces modèles définissent les moyens pour les parties afin de prendre des mesures appropriées dans certaines circonstances énoncées dans le contrat.

- i. **Sélection adverse** : en cas de la sélection adverse, la partie principale (l'employeur) n'est pas pleinement informée des facteurs de l'employé, dans laquelle l'employé transmet des informations sur lui-même à l'employeur, mais les employés peuvent mentir et ne pas révéler leurs informations privées précises [82]. Cette information est connue sous le nom de «type d'agent ». Par exemple, les personnes qui tombent fréquemment malades sont plus susceptibles de souscrire une assurance-maladie et sont moins susceptibles d'informer l'assureur qu'elles sont souvent malades [81]. Ceci qui pousse la partie principale ( *i.e.* l'employeur) a proposé des contrats qui obligent la partie informée ( *i.e.* l'employé) à choisir le contrat prévu pour elle et qui révèle son vrai statut. En utilisant le principe de la révélation, l'employeur peut offrir des contrats  $(t, r)$  destinés aux employés ayant des niveaux de compétence différents, où  $t$  correspond au résultat requis par l'employé, et  $r$  représente les récompenses versées par l'employeur. L'asymétrie d'information entre les entités est présente avant que l'employeur ne propose un accord aux employés, appelés informations asymétriques précontractuelles [80].
- ii. **Aléa moral** : en cas de risque moral, les employés peuvent prendre des mesures qui ne sont pas observées par l'employeur. Une telle asymétrie d'information apparaît après la signature des contrats par les deux parties, dite asymétrie d'information post-contractuelle [82]. Dans ce type, le contrat est un ensemble action-récompense  $(a, r)$  où  $a$  est l'effort ou l'action offerte par l'employé après être embauché, et  $r$  est la récompense de l'employé versée par l'employeur [80].
- iii. **Mixte** : dans la pratique, il est généralement difficile de savoir lequel des deux problèmes est le plus approprié pour modéliser un scénario spécifique, c'est-à-dire pour déterminer s'il s'agit d'un problème d'aléa moral ou d'un problème de sélection adverse. En effet, la plupart des problèmes d'incitation sont des combinaisons d'aléa moral et de sélection adverse [80].

### 3.8.4 Théorie des contrats dans les réseaux sans fil

La théorie des contrats a été adoptée récemment dans les réseaux sans fil pour assurer le déploiement réussi de plusieurs solutions d'allocation des ressources. Dans les réseaux sans fil, les rôles des employeurs et des employés peuvent être différents selon les scénarios. Un employeur peut être un fournisseur de services (Service Provider, SP), une société de transports, ou un propriétaire de spectre autorisé. Un employé peut être un utilisateur, un véhicule, un appareil intelligent, ou un autre tiers. La théorie des contrats permet à un

acteur de réseau appelé principal (employeur) de motiver les agents (employé) à participer ou à accepter le déploiement de solution d'allocation des ressources optimales en présence d'informations asymétriques. Cette asymétrie d'information capture l'incapacité d'une partie du système à observer les informations pertinentes qui sont privées à l'autre partie et peuvent être utilisées pour manipuler les accords et améliorer ses propres performances dans le réseau. Les informations privées peuvent correspondre à la volonté des utilisateurs de servir d'autres utilisateurs via les communications D2D (Device to Device) ou à la volonté des CPs de mettre en cache leur contenu dans les stations de base cellulaires, les véhicules ou les appareils des utilisateurs [80], [82].

### 3.8.5 Composants et terminologies clés pour la conception de contrat dans le contexte des réseaux sans fils

Nous citons dans les points suivants les principaux composants et terminologies utilisés lors de la conception des contrats pour les réseaux sans fil [82], [84]:

- **Principal** : le but du principal est d'encourager les agents à utiliser les ressources en concevant et en proposant un ensemble des contrats.
- **Agents** : chaque agent peut choisir l'un des contrats proposés par le mandant (le principal) dans le but d'améliorer ses performances dans le réseau. Si un agent ne bénéficie pas de l'un des contrats, il peut décliner toutes les offres.
- **Type d'agent** : les agents disposent d'informations privées qui modélisent soit leur volonté d'utiliser les ressources réseau, soit leur impact sur les ressources réseau. Donc, chaque agent est caractérisé par un type, noté  $\theta$ .
- **Ensemble de contrats** : le principal propose un contrat  $(r_n, \pi_n)$  pour chaque type d'agents  $\theta_n$ , où  $r_n$  est la ressource réseau (par exemple, bande de fréquences, espace de mise en cache) que le principal alloue à l'agent  $n$  en échange d'un actif monétaire  $\pi_n$ .
- **Fonction d'utilité** : détermine les utilités que chaque agent et principal attribue à chaque type de contrat. Où chaque agent sélectionne le contrat qui maximise son utilité et le principal conçoit un contrat pour le type de chaque agent afin qu'il optimise son utilité.

Donc le but principal est d'identifier l'ensemble de contrats qui maximise son utilité, sous réserve d'être réalisable et individuellement rationnel. Ces deux conditions connues sous le nom de **rationalité individuelle** et de **compatibilité incitative** sont nécessaires et suffisantes pour la faisabilité des contrats.

### 3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales de la théorie des jeux. Nous avons commencé par définir les concepts de base, les différents types des jeux de la théorie des jeux et les domaines d'application possibles. Ensuite, nous avons présenté les deux formes de représentation d'un jeu. Après, nous avons détaillé les jeux séquentiels et certains de leurs principaux éléments. Enfin, nous avons présenté les notions fondamentales de la théorie des contrats.

Dans le chapitre suivant, nous avons utilisé la théorie des jeux et la théorie des contrats pour modéliser formellement l'interaction entre les acteurs d'une stratégie de l'incitation à la mise en cache.