



**HAL**  
open science

# Mécanismes de négociation multilatérale pour la prise de décision collective

Ndeye Arame Diago

► **To cite this version:**

Ndeye Arame Diago. Mécanismes de négociation multilatérale pour la prise de décision collective. Intelligence artificielle [cs.AI]. Université de Lyon; Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2018. Français. NNT : 2018LYSE1174 . tel-02027250

**HAL Id: tel-02027250**

**<https://theses.hal.science/tel-02027250>**

Submitted on 20 Feb 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° d'ordre NNT : 2018LYSE1174

**THÈSE EN COTUTELLE**  
opérée au sein de  
**Université Claude Bernard Lyon 1**  
**Université Cheikh Anta Diop de Dakar**

**Spécialité de doctorat : Informatique**  
**Discipline : Système multi-agents**

Soutenue publiquement le 17/09/2018  
**Mme Ndeye Arame DIAGO**

---

# Mécanismes de négociation multilatérale pour la prise de décision collective

---

Devant le jury composé de :

M. AN Bo, Professeur, Nanyang Technological University	Examineur
M. MAUDET Nicolas, Professeur, Université de Paris 6	Rapporteur
Mme MERGHEM Leila, Professeur, Université de Technologie Troyes	Rapporteur
Mme BONZON Elise, MCF, Université Paris Descartes-Paris 5	Examinatrice
M. KHEDDOUCI Hamamache, Professeur, Université Lyon 1	Examineur
M. AKNINE Samir, Professeur, Université de Lyon 1	Directeur de thèse
M. SENE Mbaye, MCF, Université Cheikh Anta Diop	Co-directeur



## RÉSUMÉ

La prise de décision collective est un processus dans lequel un groupe d'individus, ayant des intérêts différents, se réunit pour trouver une solution collective à un problème. Ce processus est inhérent aux activités de toute organisation politique, économique ou sociale. Le développement de l'Intelligence Artificielle notamment les Systèmes Multi-Agents a permis la modélisation et l'automatisation des processus de prise de décision afin de mieux comprendre et d'analyser leur fonctionnement. Une décision collective peut être prise par vote ou par négociation. Dans le cadre de cette thèse, nous abordons les mécanismes de négociation multilatérale pour la prise de décision collective basés sur des approches heuristiques. Les agents construisent la solution à leur problème à travers leurs interactions, à la différence des modèles basés sur la théorie des jeux dont l'espace des solutions est supposé connu par tous les agents. Le problème des négociations heuristiques réside dans les mécanismes de raisonnement des agents dont la complexité augmente lorsque le nombre d'agents et d'attributs à négocier devient important. L'objectif de cette thèse est ainsi de proposer des mécanismes de négociation décentralisés (sans médiateur) et distribués en mettant en exergue l'aspect organisationnel des agents. Notre approche s'inspire du concept "diviser pour régner" et permet aux agents de négocier de façon incrémentale. Le but est de faciliter la recherche d'accords et de limiter la complexité du raisonnement des agents. Les travaux de cette thèse ont abouti à trois contributions abordant la négociation multi-agents sous différents angles tels que : l'organisation des agents, le protocole d'interaction, les stratégies de concession ainsi que le choix de solutions équitables et justes. Pour valider nos propositions, nous avons implémenté sous Java/Jade les mécanismes de négociation proposés. Les critères de performance que nous avons évalués sont, notamment, la convergence, le temps de négociation et la qualité de la solution. Nous avons comparé nos modèles avec ceux existants, et les résultats obtenus montrent leur efficacité pour l'obtention d'accords entre les agents.



## **ABSTRACT**

Collective decision making is a process in which many participants with different interests interact in order to build a solution to their problem. It is inherent to many organisations and companies. Nowadays, the advances in Artificial Intelligence, notably, Multi-Agents Systems enabled the automation of decision-making processes in order to analyse and to better understand how these mechanisms work. A collective decision may be made by using a voting system or by using negotiation. In this thesis, we focus on multilateral negotiation for collective decision making by proposing negotiation models. The proposed models based on heuristic approach. The agents interact with them in order to build a solution to their problem. Our solutions are different from models based on game theory where the set of possible solutions are supposed to be known by all agents. Agents' reasoning may be very complex in heuristic negotiation models. This complexity grows when the number of agents and issues to be negotiated are important. The goal of this research work consists of devising negotiation mechanisms where agents' interactions are fully decentralized. We focus on organisation aspect of the multi-agent system by using "divide and conquer" approach in order to reduce the negotiation complexity and hence to facilitate research of agreements. Our works tackle negotiation under different contexts which lead us to bring three contributions which focus on agents' organization, interaction protocols, negotiation object, concession strategies and effective and fair solution concept. The proposed mechanisms have been implemented in Java/Jade. We analysed the convergence of the negotiation, negotiation time and quality of the solution. Our models are compared with a centralized approach where all of the agents are gathered into a single group in which they negotiate. Our empirical analyses show that our mechanisms allow the agents to reach collective agreements.



## REMERCIEMENTS

Je commence tout d'abord à remercier le Bon Dieu de m'avoir donné la santé, la force, le courage et la volonté d'accomplir ce travail de thèse.

Mes vifs remerciements vont à l'endroit de mes encadrants : Professeur Samir AKNINE pour avoir précieusement suivi ce travail de thèse durant toutes ces années. Ses conseils, sa disponibilité et sa patience ont été un grand apport ; Dr Mbaye SENE pour avoir été mon professeur durant mes années de formation au département d'informatique de l'Université Cheikh Anta Diop. Je le remercie également pour ses conseils et orientations en tant que co-encadrant de cette thèse. Ils m'ont aidé et accompagné et m'ont fait confiance.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de Professeur Onn SHEHORY et Dr Sarvapali RAMCHURN collaborateurs externes. Leurs idées, conseils et orientations ont été très précieux et ont beaucoup contribué à l'aboutissement de ce travail de thèse.

Je remercie l'état du Sénégal, le PAPES (Projet d'Appui à la Promotion des Enseignantes-chercheuses du Sénégal), et le laboratoire de LIRIS pour leur contribution financière dans ce projet de thèse.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux membres du jury : Pr Nicolas MAUDET et Pr Leila MERGHEM comme rapporteurs, ainsi que Pr Bo AN, Mme Elise BONZON, Pr Hamamache KHEDDOUCI comme examinateurs. Je les remercie d'avoir accepté d'évaluer mon travail. Leurs remarques et jugements sont pertinents et très enrichissants.

Je remercie mes très chers parents Ibrahima DIAGO et Mame Khady SOKHNA qui ont toujours été là pour leurs enfants. Merci d'être mes parents, de m'avoir donné une bonne éducation. De m'avoir supporté et appuyé durant toutes ces années. De m'avoir inculqué de vraies valeurs et de m'avoir permis de devenir la personne que je suis aujourd'hui.

Je remercie mes frères et sœurs : Mamadou Moustapha DIAGO , Elhadji Ibrahima DIAGO, Ndeye Awa DIAGO et Elhadji Alioune DIAGO de m'avoir accompagné, encouragé et soutenu depuis toujours. Sans oublier Enthia, Maimouna, khady et Ablaye. Je les remercie également pour leur amour.

J'adresse un remerciement spécial et chaleureux à mon très cher époux, ami, et confident Thierno DIENG pour son amour, sa patience et sa générosité. Il m'a soutenu, aidé et accompagné durant toutes ces années. Je le remercie également pour les relectures et corrections apportées dans toutes les productions scientifiques que j'ai eu à faire durant mes travaux de recherche. Je remercie également toute ma belle famille.

Je remercie toute ma famille : mes tantes, mes oncles, mes tontons, mes cousins (Babacar BITEYE pour les corrections apportées), mes cousines, mes neveux, mes nièces, du côté de la famille SOKHNA et DIAGO pour leurs conseils et accompagnements depuis toujours. Mention spéciale à Tonton Baye Mbaye SOKHNA pour toutes les années qu'il m'a accompagné et soutenu à Dakar durant mon cursus universitaire. Je remercie également Tonton COULIBALLY, Mr DIATTA, Dr Salif SY pour leur soutien.

Je remercie également Baye Moctar KA et ma tante Combé SOW pour leurs prières et accompagnements.

Je remercie mes amis et collègues : Awa Diattara (ma jumelle) et son mari Mamour DIOP pour leurs nombreuses relectures, leurs conseils, encouragements ; Pascal François Faye qui a initié la collaboration entre le département informatique de l'université Cheikh Anta Diop et le laboratoire de LIRIS. Je le remercie également pour sa disponibilité, ses conseils et pour toutes les années passées ensemble à la section informatique et à Lyon.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit à toute l'équipe SMA du LIRIS et à tous mes amis et promotionnaires de la section informatique et de Lyon 1. Je remercie également tous mes voisins de la résidence Jean Meygret.

Je remercie également le directeur du laboratoire de LIRIS Said HACID et toute son équipe, particulièrement, Isabelle BUISSON, Brigitte GUYADE et Catherine LOMBARDI pour leur disponibilité et leur accompagnement depuis mon arrivée au LIRIS.





## TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>Introduction générale</b>	<b>15</b>
I.	Problématique et objectifs de la thèse . . . . .	16
II.	Contributions . . . . .	18
III.	Plan du document . . . . .	21
IV.	Conclusion . . . . .	22
<b>2</b>	<b>Modèles de prise de décision collective</b>	<b>23</b>
I.	Introduction . . . . .	24
II.	Les systèmes de vote . . . . .	25
1	Quelques critères de vote . . . . .	26
2	Systèmes de vote et systèmes multi-agents . . . . .	29
III.	La négociation multi-agents . . . . .	30
1	Les approches de négociation multi-agents . . . . .	31
2	Protocoles de négociation . . . . .	36
IV.	La théorie du bien-être social . . . . .	43
V.	Positionnement de la thèse . . . . .	45
VI.	Conclusion . . . . .	48
<b>3</b>	<b>Mécanisme de négociation multilatérale : Approche "diviser pour régner"</b>	<b>49</b>
I.	Introduction . . . . .	50
II.	Approche générale . . . . .	51
III.	Présentation du modèle . . . . .	52
1	Exemple de scénario . . . . .	52
2	Modèle proposé . . . . .	53
IV.	Cadre de la négociation . . . . .	55
1	Fonction d'utilité et Aspirations : . . . . .	55
2	Actes de communication : . . . . .	56
V.	Protocole de négociation . . . . .	58
1	Stratégies et tactiques de négociation . . . . .	58
2	Le degré de satisfaction des agents . . . . .	62
3	Concept de solution équitable et juste : . . . . .	62
VI.	Protocole de négociation distribuée . . . . .	69
1	Répartition des agents en anneaux . . . . .	69
2	Négociation au sein d'un groupe . . . . .	71
3	Les politiques d'interaction inter-groupes (inter-anneaux) . . . . .	71

4	Stratégies de migration des agents . . . . .	73
5	Les points de contrôle . . . . .	75
VII.	Discussions . . . . .	77
VIII.	Conclusion . . . . .	80
<b>4</b>	<b>Décision collective sur plusieurs attributs</b>	<b>83</b>
I.	Introduction . . . . .	84
II.	Approche générale . . . . .	85
III.	Présentation du modèle . . . . .	86
1	Exemple de scénario . . . . .	86
2	Modèle proposé . . . . .	87
IV.	Formalisation . . . . .	89
1	Agents et Groupes . . . . .	89
2	Propositions et fonctions d'utilité . . . . .	89
3	Communication entre les agents . . . . .	90
V.	Protocole de négociation . . . . .	90
1	Phase de formation des groupes . . . . .	90
2	Phase de négociation . . . . .	92
3	Les points de contrôle . . . . .	100
VI.	Complexité de la négociation . . . . .	100
VII.	Conclusion . . . . .	102
<b>5</b>	<b>Mécanisme de négociation hiérarchique</b>	<b>105</b>
I.	Introduction . . . . .	106
II.	Présentation du modèle de négociation . . . . .	107
III.	Formalisation du modèle . . . . .	111
IV.	Le mécanisme de négociation . . . . .	112
1	Formation de Clusters . . . . .	112
2	Les types d'offres . . . . .	115
3	Négociation dans un <i>cluster</i> . . . . .	117
V.	Tactiques de négociation . . . . .	121
VI.	Évaluation de la solution de négociation . . . . .	125
VII.	Analyse de la complexité . . . . .	126
1	Négociation dans le meilleur des cas . . . . .	126
2	Négociation dans le pire des cas . . . . .	127
VIII.	Conclusion . . . . .	129
<b>6</b>	<b>Validation empirique</b>	<b>131</b>
I.	Méthodologie générale . . . . .	132
II.	Évaluation de la première contribution . . . . .	133
1	Analyse et méthodologie . . . . .	133
2	Scénario et déroulement de l'expérimentation . . . . .	135
3	Résultats empiriques . . . . .	137
4	Les variantes du protocole . . . . .	140
5	Étude comparative des différentes variantes du protocole . . . . .	142
III.	Évaluation de la deuxième contribution . . . . .	144
1	Scénario et déroulement de l'expérimentation . . . . .	145
2	Résultats empiriques . . . . .	145
IV.	Évaluation de la troisième contribution . . . . .	145
1	Méthodologie . . . . .	147

2	Scénario et déroulement de l'expérimentation . . . . .	147
3	Résultats empiriques . . . . .	149
<b>7</b>	<b>Conclusion Générale</b>	<b>155</b>
I.	La répartition des agents en groupes . . . . .	156
II.	les protocoles . . . . .	157
III.	Choix de solution équitable et juste . . . . .	159
IV.	Perspectives . . . . .	159
1	Pistes de recherche . . . . .	159
2	Portée de nos travaux de recherche . . . . .	161



# Chapitre 1

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les systèmes multi-agents (SMA) sont à la croisée de plusieurs domaines tels que l'intelligence artificielle distribuée, les systèmes répartis et le génie logiciel. Leur but est de permettre la mise en collaboration de différents systèmes intelligents. Les SMA s'appliquent dans plusieurs contextes comme la conduite autonome [28], le traitement de grandes quantités de données [52], la reconnaissance d'images et de texte, la vision par ordinateur [62, 83], le commerce électronique [58, 109, 96, 64], la santé connectée, etc.

Cette thèse s'intéresse aux modèles de coordination dans les systèmes multi-agents, notamment, les mécanismes de négociation multi-agents. La négociation est un processus d'échanges qui permet à des parties en conflit de trouver un accord qui satisfait leurs objectifs. La négociation est fondamentale dans les systèmes multi-agents, et fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Elle s'applique dans plusieurs contextes tels que la vente et l'achat automatique, l'allocation des ressources, la répartition et la résolution des tâches de manière distribuée, la prise de décision collective, etc.

L'approche multi-agents prend tout son intérêt dans la modélisation et dans l'étude des processus de prise de décision qui sont au cœur de nos activités quotidiennes, des organismes gouvernementaux ou non gouvernementaux et des entreprises. De nos jours, toutes ces entités sont confrontées à des problèmes de prise de décision liés à la complexité de leur organisation, aux conflits d'intérêts des acteurs décideurs, à la présence de plusieurs alternatives de solutions, et à l'incertitude des conséquences des choix effectués. Nombreux sont aujourd'hui, les travaux de recherche qui se focalisent sur l'étude des mécanismes de prise de décision. Ces travaux s'appuient sur des théories issues de différents domaines tels que l'économie, la sociologie et la technologie.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous focalisons sur la problématique de la négociation pour la prise de décision collective.

La suite de ce chapitre est structurée comme suit : la section I. décrit la problématique et les objectifs de la thèse, la section II. introduit nos différentes contributions et la section III. annonce le plan de ce document.

## **I. Problématique et objectifs de la thèse**

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons aux modèles de négociation multi-agents pour la prise de décision collective dans un contexte où nous considérons un nombre important d'agents. La prise de décision collective est un processus dans lequel plusieurs décideurs échangent leurs avis en vue de trouver une solution à un problème donné. Dans la pratique, ces décideurs ont des intérêts divergents et chacun peut se comporter de manière égoïste. Chaque décideur cherche à défendre ses propres intérêts, à influencer les autres, et les convaincre à agir d'une certaine manière.

L'automatisation d'un tel processus d'échange nécessite une étude et une analyse très fine des différents facteurs inhérents à la prise de décision.

La recherche dans le domaine de la négociation multi-agents tourne autour de trois grands axes [51, 50] : (1) la conception des protocoles de négociation qui consiste à définir l'ensemble des règles qui régissent les comportements des agents; (2) l'objet de la négociation portant sur un ou plusieurs attributs; (3) le modèle de raisonnement des agents qui consiste à fournir l'ensemble des fonctions de décision des agents. La prise en compte de chacun de ces différents aspects peut amener à différents modèles de négociation. Dans la littérature, de nombreux travaux ont été effectués sur les mécanismes de négociation bilatérale, à la différence des négociations multilatérales qui ont reçu moins d'attention en raison de leur complexité. La plupart des mécanismes de négociation multilatérale proposés étendent les protocoles bilatéraux. Dans plusieurs cas, ils se fondent sur des hypothèses qui sont souvent difficilement applicables dans la réalité ou n'intègrent pas certains aspects tels que l'organisation du système multi-agents et les stratégies de prise de décision qui peuvent impacter les résultats de la négociation.

Le défi majeur de tout processus de négociation est d'arriver à des accords collectifs répondant aux objectifs de chacune des parties. La difficulté dans cette

recherche d'accords collectifs vient de plusieurs facteurs tels que la complexité du raisonnement, accentuée par le fait que les parties ne partagent pas leurs informations concernant leur fonction d'utilité; la prise de décision reflétant l'état mental du négociateur, c'est-à-dire ses croyances et ses désirs; les blocages de la négociation et le temps imparti à la négociation. Pour aborder cette problématique nous mettons d'abord l'accent sur l'aspect organisationnel des agents. L'organisation des agents peut affecter la complexité, la réactivité et la flexibilité du système [46]. Ensuite, nous étudions l'ensemble des politiques d'interaction permettant aux agents d'atteindre des accords collectifs qui répondent au mieux à leurs objectifs. Enfin, nous procédons à l'étude et à l'analyse des critères d'acceptabilité de l'accord final du point de vue de la *justice sociale* [81]. Les travaux sur la négociation multilatérale proposent en grande partie des approches centralisées ou recourent à des médiateurs jouant le rôle de facilitateur de la négociation. Ces approches souffrent de plusieurs limites dont le fait qu'elles reposent sur un unique point de contrôle. Ainsi, dans ce travail de thèse, nous nous focalisons sur les mécanismes de négociation décentralisés.

L'objectif de cette thèse est de concevoir des mécanismes de négociation multilatérale dans un contexte où les agents sont égoïstes mais ont besoin de négocier pour atteindre leurs objectifs. L'interaction des agents est totalement décentralisée et s'effectue de manière simultanée. Autrement dit, la négociation s'effectue sans médiation, chaque agent prend ses décisions selon ses propres croyances et ses désirs. Il est aussi libre de participer à tout moment aux discussions. La mise en place d'un tel mécanisme de négociation nécessite des protocoles spécifiques pouvant guider les agents dans leur processus d'interaction. Nous proposons alors des mécanismes s'appuyant sur une approche incrémentale permettant d'appréhender la complexité du raisonnement des agents, de faciliter la convergence de la négociation et de limiter le temps pour l'obtention des accords.

Un autre aspect pertinent de la négociation est la qualité de la solution que l'on peut mesurer par la satisfaction de chacun des négociateurs vis-à-vis du choix collectif ou par la satisfaction sociale, c'est-à-dire, par le bien-être social. La théorie du bien-être social est largement étudiée en économie. Il a été montré qu'il est assez difficile de trouver un critère de décision sociale qui satisfait toutes les conditions d'un processus de décision sociale raisonnable selon Kenneth J Arrow [6]. Dans cette thèse, nous nous intéressons, par ailleurs, aux critères de choix de la solution finale lorsqu'il existe plusieurs solutions acceptables. Notre but est alors de proposer un processus de décision sociale qui permet de garantir un choix collectif équitable et juste [81].

## II. Contributions

Nos contributions portent sur la proposition, la mise en œuvre et l'évaluation des mécanismes de négociation multilatérale totalement décentralisés selon une approche itérative et incrémentale. Ces mécanismes peuvent être appliqués à différents contextes de négociation. Notre approche s'inspire du concept « Diviser pour régner ». Ce concept est utilisé dans plusieurs domaines tels que l'informatique, l'économie et la politique. En informatique, il est défini comme une technique de résolution de problèmes consistant à subdiviser un problème en sous problèmes traités séparément. La solution du problème étant la fusion des résultats obtenus. En économie et en politique, « diviser pour régner » prend la forme d'une stratégie consistant à semer la discorde dans un groupe d'individus afin de les influencer et de maintenir du pouvoir sur eux. En négociation économique, il s'agit d'identifier les faiblesses de la partie adverse et de les utiliser afin de l'influencer. Notre but est d'utiliser tous les atouts de la méthode « diviser pour régner » dans un contexte de négociation multi-agents particulièrement le cas multilatéral. Les recherches effectuées durant cette thèse, ont abouti à trois contributions abordant la négociation multilatérale avec des orientations différentes :

- La première contribution se focalise sur les négociations dont l'objet porte sur un seul attribut.
- La deuxième contribution concerne les négociations impliquant plusieurs attributs et met en exergue le principe de négociation en équipe.
- La troisième contribution intègre le fait que chaque agent peut pondérer les attributs qu'il souhaite négocier, c'est-à-dire, leur affecter des poids différents en fonction de leur importance.

◆ Dans la première contribution (Figure 1.1), les agents négocient sur un seul attribut. Chaque agent peut suggérer une proposition qui peut être retenue comme la solution finale de la négociation si elle est acceptée par la majorité des agents.

Le mécanisme de négociation proposé consiste d'abord à répartir les agents en petits groupes appelés anneaux. Cette répartition peut se faire de différentes manières : aléatoire ou stratégique, c'est-à-dire en fonction du poids des agents. Ce poids représente l'importance des agents dans la prise de décision. Ensuite, nous proposons des politiques d'interaction adaptées permettant de faciliter la convergence de la négociation vers un accord collectivement satisfaisant tout

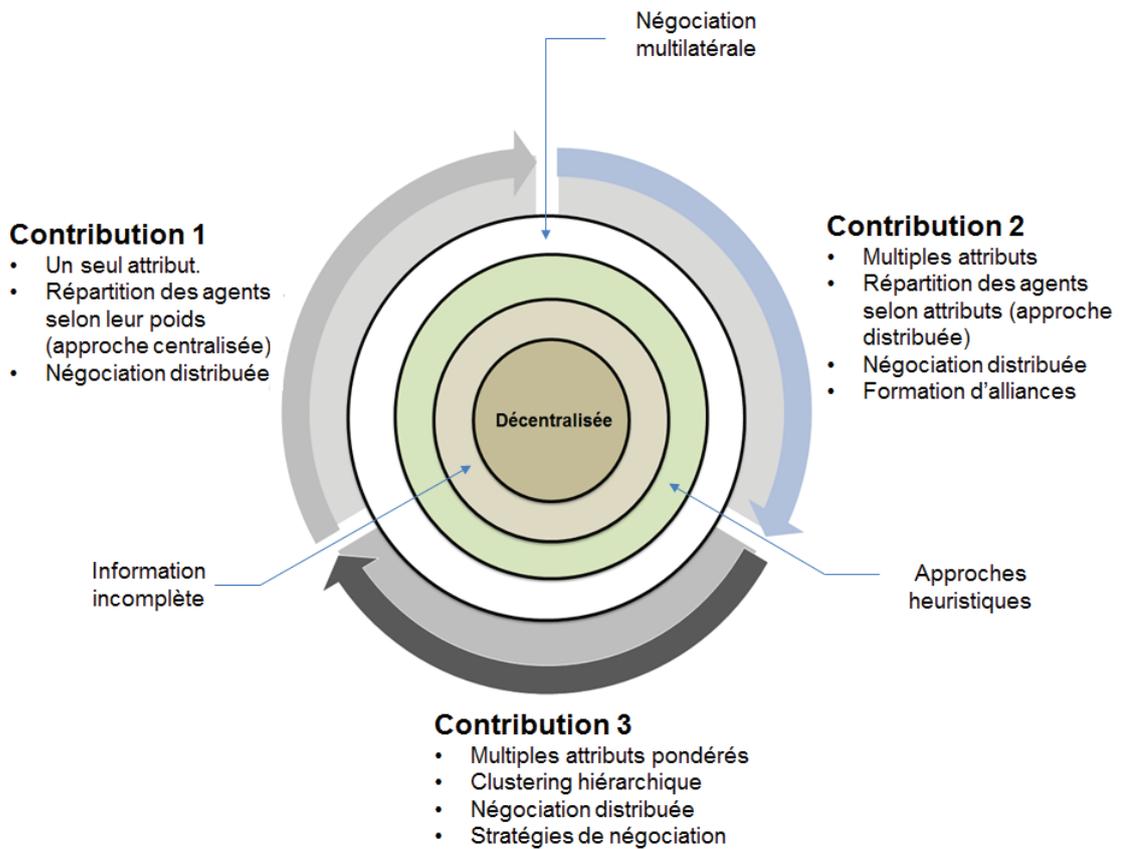


FIGURE 1.1: Contributions de la thèse

en réduisant le temps de la négociation. Nous mettons en place un ensemble de stratégies de négociation permettant d'une part, aux agents de prendre des décisions satisfaisantes et d'autre part, de convaincre les autres agents à accepter leurs propositions. La négociation s'effectue simultanément dans chaque anneau (groupe d'agents) par la communication directe, et entre les anneaux par l'écoute flottante [11]. Les politiques d'interaction proposées nous ont conduit à définir différents protocoles de négociation que nous avons analysés théoriquement et empiriquement.

Un autre point fondamental sur lequel nous mettons l'accent est l'acceptabilité de l'accord final. Ici, le choix collectif s'appuie sur la règle de majorité mais celle-ci reste souvent insuffisante pour garantir l'équité comme le montre le *paradoxe de Condorcet* [39]. Nous proposons alors un processus de décision sociale basé sur un ensemble de critères de décision hiérarchiques permettant d'établir à la fin de la négociation un ordre de préférence sociale sur toutes les propositions soumises

par les agents.

◆ Dans la deuxième contribution de cette thèse (Figure 1.1), nous restons toujours dans l'optique de proposer des mécanismes de négociation fondés sur une approche incrémentale. Le but est de réduire la complexité du raisonnement des agents et de faciliter la recherche d'accords collectifs. Cette fois-ci, nous considérons le cas où l'objet de la négociation porte sur plusieurs attributs. Nous nous plaçons dans un contexte où chaque agent peut s'intéresser seulement à une partie des attributs à négocier. Chaque agent peut suggérer des solutions (éventuellement des solutions partielles) concernant les attributs qui l'intéressent. Cependant, la solution finale portant sur tous les attributs sera déterminée en combinant les solutions partielles établies par les agents durant leurs interactions. Il s'agit alors d'effectuer un choix collectif sur chaque attribut négocié. Le modèle de négociation que nous proposons consiste à répartir les agents en plusieurs groupes en fonction de leurs choix sur les attributs qu'ils souhaitent négocier. Dans chaque groupe, les agents négocient sur les attributs qu'ils ont en commun et forment des alliances s'ils s'accordent sur une proposition. Les alliances créées vont ensuite former de nouveaux groupes soit pour fusionner leurs propositions, soit pour renégocier les attributs sur lesquels des conflits subsistent. Ce processus continue jusqu'à ce que le temps imparti à la négociation soit atteint ou jusqu'à ce qu'une alliance regroupe la majorité des agents et supporte une proposition concernant tous les attributs.

Pour illustrer ce mécanisme de négociation, nous considérons un scénario dans le marché de l'énergie notamment l'achat groupé d'énergie par une copropriété composée de plusieurs foyers. Ces derniers doivent définir ensemble le genre de contrat auquel ils vont souscrire. Ainsi, ils vont négocier pour choisir par exemple, les fournisseurs d'énergie, les heures de fourniture d'énergie, la durée du contrat etc. Dans un cadre réel, le nombre d'attributs est plus important. Les foyers ont des profils de consommation différents. Nous considérons, par ailleurs, que les foyers ont des choix différents sur les éléments du contrat. Chacun, selon ses besoins, peut s'intéresser à une partie des éléments du contrat. Certains s'intéressent, par exemple, au choix des fournisseurs et d'autres à la durée du contrat. Enfin, nous pouvons imaginer tous les choix possibles, mais le contrat collectif final doit concerner tous les attributs.

◆ La troisième contribution s'appuie sur les mêmes hypothèses que celles de la deuxième et s'attaque aux mécanismes de négociation portant sur de multiples attributs qui peuvent avoir des poids différents selon chaque agent (Figure 1.1).

Dans cette contribution, nous proposons une organisation des agents fondée sur les techniques de classification hiérarchiques. Les algorithmes de clustering sont bien connus dans le domaine d'analyse de données (*datamining*). Ils permettent le partitionnement des données en fonction de leurs similarités. Dans le cadre de ce travail, nous proposons un mécanisme de négociation en plusieurs étapes fondé sur une approche ascendante. Chaque agent est initialement considéré comme une alliance singleton (alliance constituée d'un seul agent) qui est en accord avec ses propres propositions portant sur les attributs qu'il souhaite négocier. Le but de chaque agent est alors de concilier progressivement, à travers des négociations, ses propositions avec celles des autres agents.

Initialement, nous avons un ensemble d'alliances singletons. À chaque étape de la négociation, les alliances sont partitionnées en groupes (clusters) de deux en fonction de leur similarité sur les attributs qu'ils souhaitent négocier. Les agents de chaque cluster négocient sur les attributs qu'ils ont en commun et forment une seule alliance s'ils trouvent un accord. Dans le cas contraire, le cluster est dissout et les alliances seront regroupées avec d'autres alliances à l'étape suivante de la négociation.

Toutes ces contributions abordent la négociation multilatérale sous différents angles. Les modèles proposés dans le cadre de cette thèse peuvent s'appliquer dans différents contextes et ils présentent un intérêt dans la mise en place d'applications multi-agents distribuées comme nous allons le montrer dans les chapitres suivants.

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous utilisons des exemples de scénarios de négociation simples pour mettre en exergue les différentes contraintes du processus de prise de décision. Toutefois, les modèles proposés dans cette thèse restent génériques et peuvent s'appliquer dans différents domaines. La section suivante annonce l'organisation et la structuration de la thèse.

### **III. Plan du document**

Ce manuscrit de thèse est structurée en six chapitres (Figure 1.2). Le chapitre 2 présente l'état de l'art. Nous rappelons d'abord des différents modèles de prise de décision collective dont les systèmes de vote et de négociation. Ensuite, nous nous focalisons sur la négociation multilatérale en présentant les différents travaux existants dans ce domaine, leurs avantages et les verrous qu'ils soulèvent. Enfin, nous positionnons nos travaux par rapport à ceux existants avant de conclure le chapitre. Les chapitres 3, 4, 5 présentent nos trois contributions détaillées respectivement dans les pages 18, 20, 20. Le chapitre 6 présente les résultats

empiriques de nos trois contributions. Le chapitre 7 présente la conclusion générale et les perspectives pour des travaux de recherche ultérieurs.



FIGURE 1.2: Plan du manuscrit de thèse

#### IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la problématique de recherche abordée dans cette thèse ainsi que les différentes contributions que nous avons apportées. Le chapitre suivant abordera l'état de l'art sur les modèles de coordination dans les systèmes multi-agents notamment les mécanismes de prise de décision.

## Chapitre 2

### **MODÈLES DE PRISE DE DÉCISION COLLECTIVE**

*Afin de modéliser et d'automatiser les processus de prise de décision collective, les systèmes multi-agents s'appuient sur plusieurs concepts venant de différents domaines tels que la philosophie, les sciences politiques, l'économie, les sciences sociales, la théorie de la décision et les mathématiques [10, 39, 6, 5]. Les travaux concernant l'étude de la prise de décision dans les systèmes multi-agents s'inspirent des organisations humaines dont les comportements des individus sont régis par des théories philosophiques, politiques et socio-économiques. Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les différents systèmes de vote, leurs avantages et leurs limites. Ensuite, nous abordons la négociation en présentant les apports positifs, les limites de ses différentes approches ainsi que les modèles existants. Enfin, nous positionnons nos travaux de thèse par rapport à cet état de l'art.*

## I. Introduction

Un système multi-agents est généralement composé d'agents ayant chacun ses propres buts et capacités. Chaque agent effectue des actions qui satisfont ses objectifs. Cependant, il peut exister un conflit d'intérêts et une interdépendance entre les actions des agents. La réalisation du but d'un agent peut dépendre des actions des autres, par exemple, dans des contextes de partage de ressources, de planification ou d'allocation des tâches, ou bien dans les processus de prise de décision impliquant plusieurs décideurs comme abordé dans ce travail de thèse. La coordination est alors définie pour manager les interdépendances entre les actions des agents [66]. C'est un processus par lequel chaque agent raisonne en prenant en compte ses actions et celles des autres dans le but de maintenir la cohérence de ses interactions. La coordination devient problématique dans les systèmes multi-agents impliquant un nombre important d'agents ayant souvent des comportements égoïstes.

Dans la littérature, il existe différentes approches pour aborder la coordination dans les systèmes multi-agents. Les approches centralisées désignent des agents superviseurs qui disposent des informations sur tous les agents du système et qui doivent connaître à tout moment leurs activités et leurs buts. Le rôle de ces agents superviseurs peut être, par exemple, d'établir des plans d'actions ou d'assigner des tâches aux agents. Cette approche centralisée souffre de plusieurs problèmes dans la pratique car il est difficile de mettre en place un agent superviseur avec une telle compétence. Par ailleurs, le système a un unique point central de défaillance. Les approches décentralisées quant à elles sont plus flexibles à l'extension du système, donc elles s'adaptent plus facilement aux systèmes distribués et ouverts. Dans un contexte coopératif, les agents ont un but commun et s'échangent leurs plans d'actions pour résoudre leur problème. Lorsque les agents sont non coopératifs les interactions sont plus complexes car les agents ne partagent pas toutes leurs informations telles que leurs fonctions d'utilités, leurs connaissances et leurs préférences. Le problème de ces approches décentralisées réside alors dans la complexité du raisonnement des agents et dans la recherche d'accords.

Dans cette thèse, nous abordons la problématique de la coordination dans un contexte de prise de décision collective où les agents ont des intérêts différents et se comportent de manière égoïste. La résolution des conflits entre les agents peut s'effectuer par le vote ou par la négociation.

Dans ce chapitre, nous abordons dans un premier temps les problématiques de chacune de ces deux formes de coordination multi-agents : le vote et la négociation.

Nous détaillons les travaux qui ont été effectués et nous positionnons nos travaux de thèse par rapport aux approches existantes.

## II. Les systèmes de vote

La théorie de la décision collective ou du choix social notamment le vote, consiste à définir des règles, et des stratégies que les agents doivent suivre afin de faire leurs choix sur une ou plusieurs options parmi un ensemble de solutions prédéfinies. Le système de vote doit aussi définir les méthodes d'agrégation des préférences des participants pour définir le résultat final (candidat gagnant). Cette étape en constitue cependant une des difficultés majeures, car elle doit à la fois garantir un choix social équitable, juste et qui correspond au mieux aux volontés des participants. Dans la littérature, plusieurs systèmes de vote ont été proposés et chacun a ses avantages et ses limites. Dans [5], Arrow présente les cinq critères que doit respecter un processus de décision et qui sont :

*Critère de totalité* : toutes les propositions possibles doivent avoir une chance d'être adoptées.

*Critère d'universalité* : la procédure doit donner un résultat sur l'ensemble des configurations. On doit toujours pouvoir déduire une volonté collective à partir des volontés individuelles.

*Critère d'unanimité* : si un candidat est préféré par la totalité des votants, il doit être le gagnant.

*Critère d'indépendance* : l'introduction d'un candidat supplémentaire ne doit pas modifier l'ordre relatif existant entre les autres candidats dans chaque bulletin.

*Critère de non dictature* : les préférences d'un individu seul ne doivent pas déterminer le choix collectif.

Le théorème d'impossibilité d'Arrow montre qu'il n'est pas possible de trouver un système de vote qui satisfait tous les critères cités ci-dessus. Par conséquent, chaque système de vote détermine quels critères doivent être respectés sans tenir compte des autres. Plusieurs critères de vote pour déterminer le candidat gagnant ont été proposés. La plupart des systèmes de vote utilisent le critère de la majorité mais il existe bien d'autres critères dont quelques-uns sont cités ci-dessous.

Dans les sections suivantes, nous présentons brièvement les avantages et les

inconvenients de quelques critères de vote et les différents modèles existants :

## 1 Quelques critères de vote

### Le critère de la majorité :

Il s'agit du critère de vote le plus utilisé par exemple dans le système à suffrage universel direct largement utilisé dans beaucoup d'élections politiques. Le système de la majorité donne vainqueur à un candidat s'il a obtenu plus de la moitié des électeurs (majorité absolue). De manière générale, dans un système de vote à la pluralité, chaque électeur vote pour un candidat et le candidat gagnant est tout simplement celui qui a le plus de voix (majorité relative).

**EXEMPLE 1** *Considérons un ensemble de 50 électeurs qui doivent choisir entre trois candidats X, Y, Z. Soit le résultat du vote suivant : 20 électeurs ont voté pour X, 15 pour Y et 15 pour Z. Dans le vote à la pluralité le candidat X est gagnant. Mais si on applique la règle de la majorité absolue, aucun des candidats n'est gagnant.*

Le système de vote à la pluralité appelé aussi *vote binaire* dans lequel chaque électeur sélectionne un et un seul candidat au détriment de tous les autres est moins expressif. Il ne permet pas aux électeurs d'exprimer leurs préférences contrairement aux systèmes de vote par classement [10]. Il présente beaucoup d'inconvénients, par exemple, le candidat désigné comme gagnant peut ne pas correspondre aux préférences des électeurs [10]. Condorcet<sup>1</sup> a apporté alors des solutions pour corriger ces inconvénients.

### Le critère de Condorcet :

Le vote Condorcet est un système de *vote par classement*, les électeurs classent les candidats dans l'ordre de leur choix. La méthode Condorcet établit que dans les bulletins avec classement des candidats, le gagnant de Condorcet, s'il existe, est le candidat, qui, comparé tour à tour à tous les autres candidats, est toujours le gagnant.

**EXEMPLE 2** [10] *Considérons un ensemble de 50 électeurs qui doivent choisir entre trois candidats X, Y, Z. Chacun de ces électeurs classe les candidats par ordre de préférence. La notation  $X > Y$  signifie que le candidat X est préféré au candidat Y. Soit le résultat de vote suivant :*

---

1. Marie Jean Antoine Nicolas de Caritat, marquis de Condorcet né le 17 septembre 1743 à Ribemont et mort le 29 mars 1794 à Bourg-la-Reine, est un mathématicien et homme politique français [9]

20 électeurs préfèrent  $X > Z > Y$ ,  $X$  est préféré à  $Z$  lui-même est préféré à  $Y$ .  
13 électeurs préfèrent  $Z > Y > X$ ,  $Z$  est préféré à  $Y$  lui-même est préféré à  $X$ .  
17 électeurs préfèrent  $Y > Z > X$ ,  $Y$  est préféré à  $Z$  lui-même est préféré à  $X$ .

Selon le vote à la pluralité le résultat est  $X > Y > Z$  alors que si la méthode de Condorcet est appliquée on obtient le classement suivant :

30 électeurs préfèrent  $Y > X$  contre 20  $X > Y$ .  
30 électeurs préfèrent  $Z > X$  contre 20  $X > Z$ .  
33 électeurs préfèrent  $Z > Y$  contre 17  $Z > Y$ .

Le résultat de ce scrutin selon Condorcet est  $Z > Y > X$  qui est contraire au résultat donné par le vote à la pluralité.

Ainsi, Condorcet met en évidence que le vote à la pluralité (majorité relative) ne permet pas toujours de choisir le candidat préféré par les électeurs. Le critère de Condorcet est cependant une méthode très lourde en termes de coûts de calcul et le nombre de comparaisons à faire est pratiquement irréalisable lorsque le nombre de candidats est très grand. Cela rend difficile son application dans un contexte réel. Les systèmes de vote par classement permettent aux électeurs de mieux exprimer leurs préférences mais ils posent encore des problèmes tels que l'intransitivité possible de la majorité appelée aussi le *Paradoxe de Condorcet* [39].

Le paradoxe de Condorcet dit qu'il est possible, lors d'un vote où l'on demande aux votants de classer trois propositions ( $X, Y$  et  $Z$ ) par ordre de préférence, qu'une majorité de votants préfère  $X$  à  $Y$ , qu'une autre préfère  $Y$  à  $Z$  et qu'une autre préfère  $Z$  à  $X$ . Les décisions prises par une majorité populaire par ce mode de scrutin ne sont donc pas, dans ce cas, cohérentes avec celles que prendrait un individu supposé rationnel, car le choix entre  $X$  et  $Z$  ne serait pas le même selon que  $Y$  est présent ou non.

Jean-Charles de Borda<sup>2</sup>, considérant que la méthode Condorcet est très lourde à mettre en œuvre, a proposé une solution alternative.

#### **Le critère de Borda :**

La méthode de Borda est un *système de vote pondéré* généralement utilisé dans les votes où de multiples gagnants doivent être choisis. Cette méthode est très utilisée aux États-unis (Ligues majeures de baseball) et elle est bien connue en Europe (concours Eurovision de la chanson) et bien dans d'autres pays. La méthode de

---

2. Jean-Charles chevalier de Borda né le 4 mai 1733 à Dax et mort le 19 février 1799 à Paris, est un mathématicien, physicien, politologue et navigateur français [?]

Borda consiste pour chaque électeur à classer les candidats par ordre de préférence et à assigner au premier de la liste un nombre positif  $n$  de points, au deuxième de la liste  $n-1$  points et au dernier de la liste 1 ou 0 point. Le nombre  $n$  doit être inférieur ou égal au nombre de candidats. Le score final de chaque candidat est la somme de tous les points qui lui sont été attribués. Le(s) candidat(s) dont le(s) score(s) est(ont) le(s) plus élevé(s) est(ont) le(s) gagnant(s). Le modèle de Borda devient un scrutin majoritaire à un tour si  $n = 1$ , seul le premier de la liste reçoit 1 point et les autres 0 point. Dans le cas où les électeurs définissent eux-mêmes leur sous-ensemble de candidats, on retrouve alors le vote par approbation.

**EXEMPLE 3** Soit un ensemble d'électeurs qui doivent élire 4 candidats. Ici  $n = 4$ , le premier candidat du classement d'un électeur reçoit 4 points et le dernier reçoit 1 point. Ci-dessous les résultats obtenus :

$B > A > C > D : 30\%$

$B > A > D > C : 30\%$

$A > C > D > B : 25\%$

$A > D > C > B : 15\%$

Pour ce scrutin un gagnant de Condorcet serait le candidat B.

Avec la méthode de Borda on obtient les scores suivants :

pour A :  $404 + 603 = 340$

pour B :  $604 + 401 = 280$

pour C :  $253 + 452 + 301 = 195$

pour D :  $153 + 552 + 301 = 185$

Le gagnant pour la méthode Borda est ici le candidat A qui est différent du résultat donné par le critère de Condorcet.

Cette méthode de Borda dite classique ne respecte pas le critère de Condorcet. Ainsi, il existe une autre variante de la méthode de Borda appelée Borda par élimination qui respecte le critère de Condorcet. Elle s'appuie sur le fait qu'un gagnant de Borda ne peut pas être un perdant de Condorcet et inversement un perdant de Borda ne peut pas être un gagnant de Condorcet. La méthode de Borda par élimination consiste alors à éliminer les perdants de Borda pour respecter le critère de Condorcet.

Le système de vote pondéré offre la possibilité aux électeurs d'exprimer aussi bien leur approbation que leur désapprobation pour chaque candidat. Cependant, ce système de vote s'expose aux problèmes de vote stratégique.

Le problème de la plupart des systèmes de vote est la différence qui peut exister entre les préférences des électeurs et le résultat final. Plusieurs travaux de recherche s'intéressent à cette problématique soit en proposant de nouvelles règles de vote et des méthodes pour permettre aux agents de converger vers un équilibre, c'est-à-dire, un choix final stable que tous les agents ne dévieront pas. Cet état d'équilibre appelé "équilibre de Nash" a été introduit par John Nash en 1950.

Le développement de la théorie des jeux a permis à plusieurs chercheurs d'analyser et de comprendre les différents aspects des systèmes de vote. Jon von Neumann et d'autres mathématiciens ont participé au développement des outils mathématiques qui sont utilisés pour analyser et évaluer les stratégies de vote. Kenneth Arrow a établi le théorème d'impossibilité d'Arrow. John Harsanyi s'est intéressé, par exemple, à l'analyse du vote par approbation et au critère de la majorité. Steven Brams et Peter Fishburn ont aussi contribué au développement de la théorie du vote. Ils ont formalisé le vote par approbation en 1977.

## 2 Systèmes de vote et systèmes multi-agents

De nos jours, la théorie du vote prend une place importante dans les systèmes multi-agents et plusieurs travaux de recherche ont été proposés. Dans [69], les auteurs abordent le problème de la prise de décision collective par le vote à la pluralité, c'est-à-dire, le gagnant est le candidat qui obtient le plus de voix. Le vote s'effectue en plusieurs tours et dans un contexte où les agents sont autonomes, et n'ont aucune information sur les préférences des autres et ne se coordonnent pas. À chaque tour, un agent peut changer stratégiquement son vote selon le résultat observé. Ces travaux se focalisent sur les stratégies de vote des agents et étudient les conditions dans lesquelles ces stratégies peuvent converger vers un résultat qui ne sera contesté par aucun agent (équilibre de Nash).

Le vote par score permet aux agents d'assigner des scores aux candidats. Le vote à la pluralité comme présenté dans [69] consiste à donner un point au candidat le plus préféré. Dans la méthode de Borda, le score de chaque candidat dépend de son classement. Dans le Veto, un point est donné à chaque candidat sauf le moins préféré et dans *K-approval*, un point est donné aux  $k$  candidats préférés. Les travaux dans [63] analysent l'ensemble des règles de scores, citées ci-dessus, dans un jeu de vote itératif et montrent les conditions dans lesquelles le vote peut converger vers un équilibre de Nash. D'autres travaux de recherche considèrent les situations où un ensemble d'agents doivent décider sur plusieurs issues interdépendantes. Par exemple, [37] utilise les jeux booléens pour modéliser et analyser les comportements rationnels des électeurs dans un jeu de vote à deux

phases permettant aux agents de négocier avant de voter. Les auteurs montrent l'influence de cette phase de négociation sur le résultat du vote et étudient les contraintes sous lesquelles des situations de non équilibre peuvent être éliminées.

En résumé, le vote permet aux participants d'exprimer leurs choix face à un ensemble de solutions prédéfinies. Selon le système de vote, chaque participant peut faire un ou plusieurs choix. Il peut pondérer ses choix en leur assignant des scores différents. Le vote peut s'effectuer sans aucune communication entre les participants, dans ce cas, chacun ignore les préférences des autres. Ainsi, le vote itératif permet à chaque participant de changer stratégiquement son choix en se basant uniquement sur le résultat des votes des autres. Le vote s'adapte bien dans un contexte de choix collectif où l'ensemble des résultats possibles est prédéfini et connu par tous les agents. Il s'applique aussi dans les systèmes multi-agents où les agents sont autonomes et ne se coordonnent pas. Les techniques d'agrégation des préférences des participants permettent de déterminer le résultat du vote. Il existe différents critères pour désigner le gagnant et chacun peut fournir un résultat différent pour le même vote.

Une autre approche pour effectuer une prise de décision collective est le consensus. Il s'agit pour les participants de négocier et de construire les solutions à leurs problèmes. La section suivante définit la négociation, ses différentes approches et les modèles existants.

### **III. La négociation multi-agents**

La négociation est dite bilatérale lorsque qu'elle implique deux participants et multilatérale lorsque le nombre de participants est supérieur à deux. Elle est une activité inhérente à notre vie quotidienne, nous l'effectuons soit consciemment ou inconsciemment pour trouver des solutions à des situations de conflit d'intérêts. La négociation est alors une compétence de vie qui nous permet d'atteindre nos objectifs, et de les adapter en fonction des contraintes de notre environnement.

Sur le plan économique, la négociation est aujourd'hui devenue une discipline reconnue du management. De nombreuses études et analyses des différents aspects de ce domaine ont conduit à la mise en place de plusieurs modèles et stratégies permettant d'améliorer la capacité et/ou la compétence à négocier. Négocier est alors un savoir-faire nécessitant de la créativité, de l'inspiration, et de l'improvisation [14].

Avec le développement de l'informatique notamment de l'intelligence artificielle, cette discipline est devenue une forme d'interaction fondamentale dans les systèmes multi-agents. Par exemple, les conflits d'intérêts peuvent survenir dans des situations telles que : la planification des tâches, le partage des ressources ou bien la prise de décision collective qui est la cible de cette thèse.

La complexité d'un processus de négociation dépend du nombre de participants, de la nature de l'objet de la négociation et de l'implication des participants dont les motivations peuvent être différentes. Dans la plupart des cas, ces participants ont un comportement égoïste et chacun défend ses propres intérêts. Le défi majeur des processus de négociation dans les systèmes multi-agents est la conception d'agents autonomes capables d'interagir de façon cohérente, de prendre des décisions qui répondent à leurs objectifs et qui convergent vers un accord consensuel.

Plusieurs travaux de recherche ont été effectués pour aborder différentes formes de négociation. Dans [50], les auteurs identifient trois principaux axes de recherche sur la négociation : *les protocoles de négociation* qui définissent l'ensemble des règles d'interaction et les actions des agents, *l'objet de la négociation* (un ou plusieurs attributs), et *le modèle de raisonnement* qui fournit les mécanismes de prise de décision des agents. Ces trois axes varient selon différents contextes de négociation. Cependant, l'étude des modèles de négociation ainsi que leurs différents aspects font appel à plusieurs disciplines dont les mathématiques, les sciences sociales et économiques pour mieux appréhender la complexité des interactions entre les agents.

## 1 Les approches de négociation multi-agents

Il existe plusieurs approches pour aborder la négociation multi-agents :

- La théorie des jeux. Elle fournit les modèles mathématiques permettant de modéliser et d'analyser les différentes stratégies de négociation, et de trouver des solutions optimales.
- L'approche heuristique. Elle se fonde sur des hypothèses plus réalistes mais ne garantit pas de solutions optimales.
- L'argumentation. Elle permet aux agents d'échanger des informations additionnelles au-delà des propositions qu'ils échangent pour convaincre d'autres à modifier leurs préférences.

Chacune de ces approches présente des apports positifs et des limites dont nous discutons ci-dessous.

### **Théorie des jeux**

La théorie des jeux est un domaine mathématique introduit en 1944 par Oskar Morgenstern et John von Neumann [101] mais ses fondements mathématiques ont été décrits autour des années 1920 par Ernst Zermelo et Émile Borel. La théorie des jeux s'intéresse à l'interaction des agents rationnels qui ont chacun pour but de prendre des décisions qui maximisent son gain. L'interaction des agents est représentée sous forme d'un jeu où les joueurs (agents) sont égoïstes et chacun étant conscient que le résultat de ses actions dépend de celles des autres. L'objectif de la théorie des jeux est alors d'analyser de façon formelle les problèmes d'interactions stratégiques des joueurs poursuivant chacun ses propres buts.

La théorie des jeux largement utilisée en économie, s'applique également aux processus de négociation automatique impliquant des agents égoïstes. Elle permet d'étudier les actions rationnelles des agents dans une négociation afin de garantir des solutions optimales. Chaque agent choisit la bonne stratégie en considérant toutes les actions possibles des autres agents. L'équilibre de Nash est un concept de solution dans la théorie des jeux décrivant un jeu où chaque agent anticipe les choix des autres et prend la meilleure décision. L'équilibre est une situation dans laquelle aucun agent ne regrette son choix, c'est-à-dire, qu'il n'aurait pas pu faire mieux compte tenu de tous les choix faits par les autres. En fait, les mécanismes de décision d'un agent se basent sur les croyances concernant le comportement des autres, ce qui induit alors des coûts de calcul exhaustifs. Le développement de la théorie de la complexité [72] a également permis d'appréhender la complexité de la recherche des stratégies optimales.

Dans la littérature, des travaux de recherche concernant la conception de protocoles de négociation (*mechanism design*) et de modèles de décision (stratégies) ont été proposés [55, 86]. La conception d'un protocole consiste à définir l'ensemble des règles qui gouvernent l'interaction des agents de telle sorte que certaines propriétés ci-dessous soient souhaitables [94, 50]. Ainsi, le choix du protocole dépend des propriétés qu'on veut garantir. Les propriétés désirables pour tout protocole de négociation sont :

***La garantie du succès*** : un protocole garantit le succès lorsqu'il est certain que les agents trouveront un accord.

**Le bien-être social** : il représente la somme des utilités des agents par rapport à une solution donnée. Un protocole maximise le bien-être social s'il assure que toute solution maximise la somme des utilités des agents. Le bien-être social peut être utilisé pour évaluer différents mécanismes en comparant leurs solutions. Cependant, se pose le problème de la comparaison d'utilités lorsque chaque agent possède sa propre fonction d'utilité et utilise une échelle différente.

**L'efficacité de Pareto** : une solution de négociation est efficace au sens Pareto s'il n'existe aucune autre solution dans laquelle au moins un agent sera dans une meilleure situation sans réduire la satisfaction d'un autre agent. Dans un protocole, les solutions maximisant le bien-être social sont un sous-ensemble des optima de Pareto. Lorsque le bien-être social est maximisé, il n'est pas possible d'augmenter l'utilité d'un agent sans diminuer celle d'un autre. La solution de Pareto mesure le bien-être global mais elle est jugée inéquitable par exemple, dans une situation d'allocation de biens. Elle n'assure pas une répartition équitable des biens.

**La rationalité individuelle** : un protocole est dit rationnel individuellement si tous les agents trouvent un intérêt à participer à la négociation. Les agents étant égoïstes, ne seront pas motivés à négocier si la solution de la négociation ne leur garantit pas un meilleur paiement que ce qu'ils auraient reçu s'ils n'avaient pas participé à la négociation.

**La stabilité** : un protocole est stable s'il permet à tous les agents de participer à la négociation et d'agir de manière à poursuivre leurs buts. Il doit être conçu de telle sorte qu'il ne soit pas manipulable. L'équilibre de Nash est un concept de stabilité dans lequel aucun agent ne regrette son choix.

**la simplicité** : tout protocole doit être simple pour permettre aux agents de trouver plus facilement les stratégies optimales.

**La distributivité** : idéalement, un protocole de négociation doit limiter les coûts de communication entre les agents. Il doit aussi s'effectuer de façon distribuée autrement dit sans unité de contrôle (un médiateur).

La théorie des jeux présente plusieurs avantages dans l'analyse des comportements des agents et de leurs stratégies. Cependant, son application dans divers contextes de négociation automatique pose beaucoup de problèmes. Elle s'appuie sur des hypothèses qui ne s'appliquent pas dans la pratique et qui ne prennent pas en

compte tous les aspects qui influencent les décisions que prennent les agents. Dans la théorie des jeux, les agents sont supposés connaître l'ensemble des solutions possibles et leurs décisions dépendent uniquement de la croyance qu'ils ont des actions que vont prendre les autres alors que, généralement dans un contexte réel, l'ensemble des solutions n'est pas connu par les agents, chaque agent ne connaît que son propre espace d'accords. Les outils mathématiques nécessaires pour calculer les stratégies optimales imposent une forte précision (distributions de probabilité) du contexte dans lequel les décisions sont prises, c'est-à-dire, une modélisation précise des croyances sur les actions des autres [42]. Ces contraintes mathématiques conduisent à de fortes hypothèses qui ne permettent pas à la théorie des jeux de mettre en place des modèles de négociation génériques applicables dans différents contextes comme ceux visés dans notre travail de thèse. Les modèles de négociation abordés dans cette thèse impliquent un nombre important d'agents égoïstes qui ne partagent pas les informations concernant leurs fonctions d'utilité. Les coûts de calcul qu'induisent les modèles de négociation basés sur la théorie des jeux et l'absence de la prise en compte de toutes les situations interdépendantes ont conduit la recherche vers d'autres approches telles que les heuristiques et l'argumentation.

### **Heuristique**

L'approche heuristique est une solution aux problèmes que pose la théorie des jeux. Elle permet d'aborder la négociation en se basant sur des hypothèses plus réalistes. Les modèles de négociation fondés sur les heuristiques ne cherchent pas à fournir des solutions optimales mais visent la conception de mécanismes dans lesquels les agents sont plus libres dans leur interaction [77, 78]. L'espace de toutes les solutions possibles n'est pas une connaissance commune. Chaque agent ne connaît que ses propres propositions qu'il échange avec les autres durant ses interactions. Les agents prennent leurs décisions au cours de la négociation selon leur raisonnement et leurs stratégies. Ces modèles de négociation sont moins contraignants comparés aux modèles fondés sur la théorie des jeux. Ils offrent plus de liberté aux agents et permettent aussi de prendre en compte plus d'aspects qui sont inhérents à la prise de décision. Les travaux de cette thèse s'orientent dans cette perspective.

L'élément fondamental des approches heuristiques est le mécanisme de raisonnement des agents pour prendre des décisions. Le mécanisme de prise de décision décrit l'ensemble des actions possibles de l'agent ainsi que ses stratégies de négociation. Les agents s'échangent des propositions et contre-propositions et la négociation se termine soit par un accord soit lorsque la date

limite de la négociation est atteinte (il est aussi possible qu'aucun accord ne soit trouvé à la fin). Chaque agent évalue les offres selon sa fonctions d'utilité et prend ses décisions selon ses stratégies.

Certains mécanismes sont basés sur le compromis. Chaque agent tente de faire des propositions susceptibles de convaincre les autres [30]. Les agents n'échangent pas d'information additionnelle mais ils s'appuient sur les dernières propositions soumises pour faire des ajustements et définir des offres similaires. Dans d'autres mécanismes, la nature de l'objet de la négociation peut être modifiée en ajoutant soit de nouveaux attributs [1] soit en supprimant certains attributs. L'objectif de tels mécanismes est de faciliter la recherche d'accords en augmentant le nombre de solutions possibles. Cela permet aussi d'éviter les blocages de la négociation. Dans d'autres approches, il s'agit de supprimer les attributs moins importants qui peuvent rendre difficile la convergence de la négociation.

L'avantage des modèles de négociation fondés sur des approches heuristiques est qu'ils s'appuient sur des hypothèses applicables dans plusieurs contextes par exemple les négociations internationales sur le climat [21, 22].

Cependant, ces mécanismes fondés sur des approches heuristiques ne garantissent pas une solution optimale car tout l'espace des solutions n'est pas exploré. Leur évaluation nécessitent des analyses théoriques et expérimentales à travers de nombreuses simulations.

Dans les deux approches présentées ci-dessous, les négociations entre les agents s'effectuent sur la base d'échanges de propositions. Une proposition est une combinaison de valeurs affectées aux attributs sur lesquels porte la négociation. La négociation consiste alors à faire varier les valeurs des attributs au fur et à mesure que la négociation avance. Les échanges de propositions entre les agents continuent jusqu'à ce qu'un accord soit trouvé ou jusqu'à ce que le temps imparti à la négociation soit atteint. Ces approches ne permettent pas aux agents d'exprimer les raisons de leurs décisions. Dans les négociations réelles, ces informations additionnelles (i.e., les justifications des décisions) qualifiées d'arguments représentent une valeur ajoutée pour la recherche d'accords. Elles permettent à certains agents de changer leur décisions et cela peut faciliter la convergence de la négociation. Ainsi, la troisième approche de négociation est l'argumentation.

## Argumentation

L'argumentation est une approche qui permet aux agents, en plus d'échanger des propositions, d'apporter des justifications concernant les propositions qu'ils soumettent et leurs décisions (i.e., acceptation ou rejet d'une proposition). Chaque agent peut fournir des arguments accompagnant ses propositions dans le but d'expliquer les raisons pour lesquelles les autres devraient les accepter. Lorsqu'un agent rejette une proposition, il peut aussi formuler des critiques expliquant les raisons pour lesquelles cette proposition est inacceptable. Cela permet à certains agents de modifier leurs croyances et préférences. Ces échanges d'informations additionnelles conduisant les agents à s'influencer mutuellement, peuvent aussi avoir un impact important sur le résultat de la négociation. Plusieurs travaux de recherche ont été effectués pour étudier et analyser les différentes techniques de persuasion et leurs impacts dans les protocoles de négociation [56, 57, 3, 50]. Les modèles de négociation basés sur l'argumentation utilisent par exemple, les modèles BDI<sup>3</sup> ou la logique modale. Les arguments que fournissent les agents se basent sur leurs croyances, désirs et intentions.

L'avantage des protocoles d'argumentation est qu'ils permettent aux agents de mettre en œuvre des techniques de persuasion pour conduire la négociation vers un résultat qui satisfait au mieux leurs objectifs. Cependant, ces modèles peuvent induire des coûts de communication supplémentaires comparés aux deux autres approches. Il est question pour chaque agent de savoir choisir les bons arguments et les moments opportuns auxquels ses arguments seront efficaces. L'agent doit également savoir interpréter et utiliser les arguments des autres agents.

## 2 Protocoles de négociation

Le protocole de négociation décrit la forme d'interaction des agents, les actions que les agents peuvent entreprendre selon des règles définies. La négociation étant une forme de prise de décision s'applique dans plusieurs contextes tels que les ventes, les réunions de groupe, la planification la répartition des tâches, etc. Dans chaque contexte, la complexité de la négociation dépend du nombre de participants et de l'étendue de l'objet de la négociation (un ou plusieurs attributs). Cependant, il est difficile, voire même impossible, de mettre en place un protocole de négociation applicable dans tous les contextes possibles. Nous présentons ci-dessous différents protocoles de négociation qui ont été proposés dans la littérature.

---

3. Belief Desire Intention

## Les protocoles d'enchère

Une enchère est une forme de vente de produits qui met en concurrence plusieurs acheteurs dans un laps de temps donné. Le vendeur fait une mise à prix sur un produit et les acheteurs proposent des offres d'achat supérieures au prix du vendeur. Le plus offrant des acheteurs sera le gagnant et gardera le produit. Il existe plusieurs types d'enchères selon la manière dont les agents proposent des prix et selon les règles du jeu. La théorie des enchères analyse les protocoles et les stratégies. Ces protocoles sont centralisés et incluent un initiateur (le vendeur) et plusieurs participants (les acheteurs). Ils sont utilisés dans des situations où le vendeur cherche à vendre son produit au prix le plus élevé tandis que les acheteurs cherchent à l'acheter au prix le plus bas. L'initiateur annonce la vente de son produit et les participants soumettent leur offres à l'initiateur. Le produit en vente revient au plus offrant choisi par l'initiateur. Les enchères s'appliquent dans plusieurs contextes tels que les appels d'offres pour des projets, la vente d'objets d'art, de mobiliers ou d'articles par des commissaire priseurs. Dans les négociations de contrats, l'initiateur voudra sous-traiter ses tâches au prix le plus bas possible et les participants qui doivent traiter les tâches voudront être payés au prix le plus grand.

Les protocoles d'enchère sont largement étudiés dans les travaux de la théorie des jeux pour déterminer les meilleures stratégies [94]. Il existe différents paramètres d'enchères selon la manière dont les participants évaluent la valeur du produit : les enchères avec valeur privée, chaque participant donne une valeur au produit mis en vente selon ses propres préférences ; les enchères avec valeur commune, la valeur de l'objet pour un participant dépend totalement de l'évaluation des autres ; les enchères avec valeur corrélée, la valeur de l'objet pour un participant dépend des évaluations internes et externes. Nous citons ci-dessous différents protocoles d'enchère :

*Enchère anglaise (premier prix-offre publique)* : dans ce protocole, chaque participant annonce son offre publiquement, ensuite le participant qui a fait la plus grande offre gagne le produit au prix de son offre. La stratégie dominante d'un participant s'il s'agit d'une enchère avec valeur privée est de proposer une valeur un peu plus élevée que celle de la plus grande récente offre jusqu'à ce que la valeur privée soit atteinte. Dans le cas d'une enchère avec valeur corrélée, le participant augmente la valeur du produit à un taux constant ou à un taux qu'il considère normal.

*Enchère Hollandaise (descendante)* : dans ce protocole, l'initiateur diminue le prix du produit jusqu'à ce qu'un participant achète le produit au prix courant annoncé.

Pour ce type de protocole, il n'existe pas de stratégie dominante.

*Enchère Vickery (deuxième prix – offre cachée)* : dans ce protocole, chaque participant soumet une offre sans savoir celles des autres. Le participant avec la plus grande offre gagne, mais au prix de la deuxième plus grande offre. La stratégie dominante est d'offrir sa vraie valeur.

La plupart des protocoles d'enchère ne se focalisent que sur les prix des objets à vendre, ainsi ils sont relativement simples à analyser. Cependant, ces protocoles centralisés s'adaptent au cas des ventes notamment en ligne mais ils posent beaucoup de problèmes tels que la manipulation, et les mensonges. L'initiateur peut mentir, utiliser des faux participants pour augmenter l'évaluation de l'objet, ou bien il peut offrir le deuxième plus grand prix dans les enchères vickery.

#### **Le Protocole de Réseaux Contractuels (Contract Net Protocol CNP)**

Le protocole de réseaux contractuels [98] est utilisé dans le domaine d'allocation des tâches qui prend une place importante dans les systèmes multi-agents. C'est un protocole de négociation distribuée donnant plus de contrôle aux agents à la différence des protocoles d'enchère qui sont centralisés et qui nécessitent un médiateur dont le rôle est de diffuser l'information entre les agents. Il s'agit d'un protocole à la fois basé sur les approches de la théorie des jeux et heuristique.

Dans le CNP original [98], les agents peuvent prendre deux rôles : gestionnaire et contractant. Le gestionnaire décompose une tâche en sous-tâches et annonce les contrats, concernant chacune des sous-tâches, aux contractants qui vont à leur tour faire des offres appropriées. Un contractant peut à son tour prendre le rôle d'un gestionnaire et proposer les contrats qu'il a lui-même reçus à d'autres contractants. Le gestionnaire alloue le contrat au contractant ayant fait la meilleure offre. Dans ce modèle, les agents sont totalement coopératifs. Les tâches sont allouées aux agents selon leur capacité de traitement et leur charge en cours. Chaque contrat concerne uniquement une seule tâche. Les discussions s'effectuent de manière informelle.

Dans les modèles récents, les agents peuvent être à la fois coopératifs et compétitifs et les échanges sont formalisés. Les décisions des agents, (acceptation/refus) des contrats, sont basées sur le calcul du coût marginal [90]. Il existe aussi d'autres types de contrats tels que les contrats par groupe de tâches (cluster contracts) qui permettent de réduire les taux de messages et d'effectuer un traitement de tâches plus efficace comparé au modèle original où les tâches sont négociées une par

une. [94] présente d'autres modèles avec d'autres types de contrats et étudie leurs propriétés.

### **Généralisation des protocoles bilatéraux pour la négociation multilatérale**

Dans la littérature, la plupart des travaux de recherche proposent des mécanismes de négociation bilatérale mais peu d'attention a été accordée au cas multilatéral. Cela ne signifie pas que ces mécanismes de négociation multilatérale sont moins importants mais ils sont très complexes surtout lorsque les nombres d'agents et de problèmes à résoudre sont très importants. Plusieurs travaux se focalisant sur ces protocoles de négociation multilatérale proposent une généralisation des protocoles bilatéraux en se basant sur de fortes hypothèses rendant ainsi ces protocoles difficilement applicables dans des contextes réels.

Le protocole de concession monotone est un processus de négociation bilatérale à plusieurs tours dans lequel les agents soumettent simultanément leurs propositions. Chaque agent évalue la proposition de son opposant et l'accepte lorsque la valeur d'utilité est supérieure à celle qu'il a soumise. La négociation se termine si l'un des agents accepte la proposition de l'autre sinon un autre tour de négociation commence et les agents concèdent ou maintiennent les mêmes offres. La stratégie de concession de Zeuthen consiste à soumettre une proposition qui donnera une meilleure utilité à son opposant. Cela suppose que chaque agent doit connaître la fonction d'utilité de l'autre. [29] propose une généralisation de ce protocole pour le cas d'une négociation multilatérale. L'auteur propose sept types de concession qui permettent aux agents de faire des propositions susceptibles d'être acceptées par les autres.

*1-concession forte* : elle consiste à faire une proposition qui augmente l'utilité de tous les agents.

*2-concession faible* : elle consiste à faire une proposition qui augmente au moins l'utilité d'un seul agent.

*3-concession de Pareto* : elle consiste à faire une proposition qui augmente l'utilité de tous mais au moins un agent a une meilleure utilité.

*4-concession utilitariste* : elle consiste à faire une proposition qui augmente la somme des utilités de tous les agents.

*5-concession égalitariste* : elle consiste à faire une proposition qui maximise la

valeur d'utilité de l'agent qui a la plus faible valeur d'utilité.

*6-concession de Nash* : elle consiste à faire une proposition qui augmente le produit des utilités de tous les agents.

*7-concession égocentrique* : elle consiste à faire une proposition qui réduit sa propre utilité.

Ces types de concessions s'appliquent dans un contexte où les agents utilisent la même fonction d'utilité pour évaluer les propositions. Cela est différent dans notre contexte où chaque agent définit sa propre fonction d'utilité.

[4] propose une généralisation du mécanisme de négociation bilatérale basé sur les offres alternées dans un contexte de négociation multilatérale (un à plusieurs, plusieurs à plusieurs). Leur modèle se fonde sur l'approche de la théorie des jeux. Ils montrent comment l'incertitude sur le prix de réserve et la date limite de la négociation affectent les stratégies d'équilibre. Ce cadre est différent de nos travaux qui s'appuient sur les approches heuristiques. Nous ne cherchons pas ici à trouver des stratégies d'équilibre. Nous proposons des mécanismes de négociation dans lesquels l'espace de toutes les solutions n'est pas connu par tous les agents.

#### **Protocoles de négociation avec médiateur**

D'autres approches de la négociation multilatérale consistent à désigner un agent médiateur qui guide les agents dans leurs interactions.

[113] aborde la négociation multilatérale multi-attributs impliquant un grand nombre d'agents et d'attributs interdépendants. Ils proposent un modèle de négociation incrémentale (hiérarchique). Leur but est de limiter les calculs et de faciliter la recherche d'accords. La négociation s'effectue en plusieurs niveaux avec l'intermédiaire d'un agent médiateur dont le rôle est d'établir un agenda de négociation qui indique à chaque niveau de la hiérarchie les attributs sur lesquels les agents doivent négocier. Pour établir l'agenda, chaque agent envoie à l'agent médiateur les inter-dépendances entre les attributs selon ses contraintes. Ainsi, le médiateur décompose l'ensemble des attributs en sous-ensembles appelés groupes de décision et les renvoie aux agents. Chaque agent classe par ordre de préférence les groupes de décision et les communique au médiateur qui à son tour établit l'agenda de négociation définissant l'ordre dans lequel les sous-ensembles d'attributs seront négociés. Les résultats de la négociation pour un sous-ensemble d'attributs ont un impact sur la négociation du sous-ensemble d'attributs

suivant. Ce modèle de négociation permet, à chaque étape de la négociation, de réduire l'espace de génération d'offres et les coûts de calcul pour évaluer les offres. Cependant, ce modèle de négociation souffre d'un point central de défaillance (le médiateur).

### **Protocoles de négociation décentralisée**

[24] aborde les modèles de négociation multilatérale basés sur l'approche heuristique. Les agents sont égoïstes et interagissent sans médiateur. Les auteurs proposent une famille d'algorithmes de négociation NB<sup>3</sup>(Negotiation-Based Branch and Bound) dans laquelle le nombre d'agents et l'espace des solutions sont importants. Leurs mécanismes de négociation s'appuient sur l'algorithme de séparation et d'évaluation pour rechercher dans l'espace d'accords les meilleures propositions à accepter ou à proposer. Ils supposent que les agents ne partagent pas leur fonction d'utilité mais les expressions de leur fonction d'utilité sont des informations publiques. Ainsi, chaque agent peut faire seulement une approximation des valeurs d'utilité des autres agents et sur un ensemble limité de propositions car l'évaluation des expressions des fonctions d'utilité pour déterminer les valeurs d'utilité réelles est très coûteuse en temps de traitement. Dans ces protocoles, le raisonnement des agents peut devenir complexe lorsque le nombre d'agents, le nombre d'attributs ainsi que l'espace des solutions sont importants.

Les travaux de [24] sont proches des nôtres dans le sens où nous proposons des mécanismes de négociation multilatérale donnant plus de liberté aux agents qui sont égoïstes et ne partagent pas leurs fonctions d'utilité. Mais la différence est que dans nos modèles de négociation, les agents ne partagent aucune information sur leur fonction d'utilité. Ils ne font aucune approximation sur la valeur d'utilité des autres agents. Nous cherchons à travers les mécanismes de négociation proposés à limiter la complexité du raisonnement des agents et à faciliter la négociation.

Dans [79], les auteurs abordent la négociation décentralisée pour la formation de coalitions. Ils proposent un nouveau cadre dans lequel les agents dans un réseau peuvent former eux-mêmes des coalitions de manière décentralisée à la différence des approches centralisées qui s'appuient sur des hypothèses difficilement applicables dans la pratique et dont le passage à l'échelle pose problème. La formation des coalitions s'effectue à travers une série de négociations bilatérales entre des paires d'agents voisins ne partageant aucune information concernant leurs préférences.

Dans [1], les auteurs abordent la négociation multilatérale sur plusieurs attributs. Ils proposent un protocole de négociation qui permet aux agents d'étendre l'espace de la négociation en proposant des offres sur des attributs additionnels au cours de la négociation. Ils montrent qu'avec cette approche, les agents sont plus amenés à être moins exigeants sur certaines contraintes, ce qui rend la négociation plus efficace.

### Le protocole des Offres Alternées

Le protocole des offres alternées est un protocole de négociation dans lequel les agents interagissent à tour de rôle. L'ordre de prise de parole est prédéfini. Lorsqu'un agent soumet une offre, l'agent au tour suivant évalue l'offre et peut soit l'accepter, soit la refuser, soit terminer la négociation. [7] présente deux extensions du protocole des offres alternées : *Stacked Alternating Offers Protocol* (SAOP) et *Alternating Multiple Offers Protocol* (AMOP).

Dans ces protocoles, chaque agent ne participe à la négociation que quand son tour arrive. Dans le protocole SAOP, un agent démarre toujours la négociation en soumettant une offre, et n'évalue que la dernière offre soumise une fois que son tour arrive. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'un accord soit trouvé, c'est-à-dire, tous les agents acceptent une offre ou jusqu'à ce que le temps imparti à la négociation soit atteint. Lorsque la date limite est atteinte et qu'aucun accord n'est trouvé la négociation se termine par un échec.

**EXEMPLE 4** *Considérons une négociation entre quatre agents  $a_1, a_2, a_3, a_4$ . L'agent  $a_1$  démarre la négociation en soumettant une offre  $O_1$ , l'agent  $a_2$  au tour suivant évalue l'offre  $O_1$  puis fait une contre-offre  $O_2$ . L'agent au tour suivant, soit  $a_3$ , évalue l'offre  $O_2$  puis fait une contre-offre  $O_3$ . L'agent  $a_4$  évalue  $O_3$  et l'accepte puis l'agent  $a_1$  évalue  $O_3$  et l'accepte puis l'agent  $a_1$  évalue à son tour  $O_3$  ainsi de suite jusqu'à la date limite ou jusqu'à ce qu'une offre soit acceptée par tous (voir Figure 2.1).*

Dans le protocole SAOP, toutes les offres ne sont pas évaluées par tous les agents. L'agent évalue toujours la dernière offre soumise. Ce protocole pose des problèmes dans un contexte de négociation multilatérale avec de multiples attributs où chaque agent peut s'intéresser qu'à une partie des attributs à négocier. Dans de tels contextes, chaque agent soumet des offres ne concernant que les attributs qui l'intéressent. Un agent dont le tour arrive, va devoir évaluer la dernière offre soumise qui peut ne pas correspondre aux attributs qui l'intéressent. Ainsi, la négociation peut être coûteuse en temps et la recherche d'accords peut être difficile.

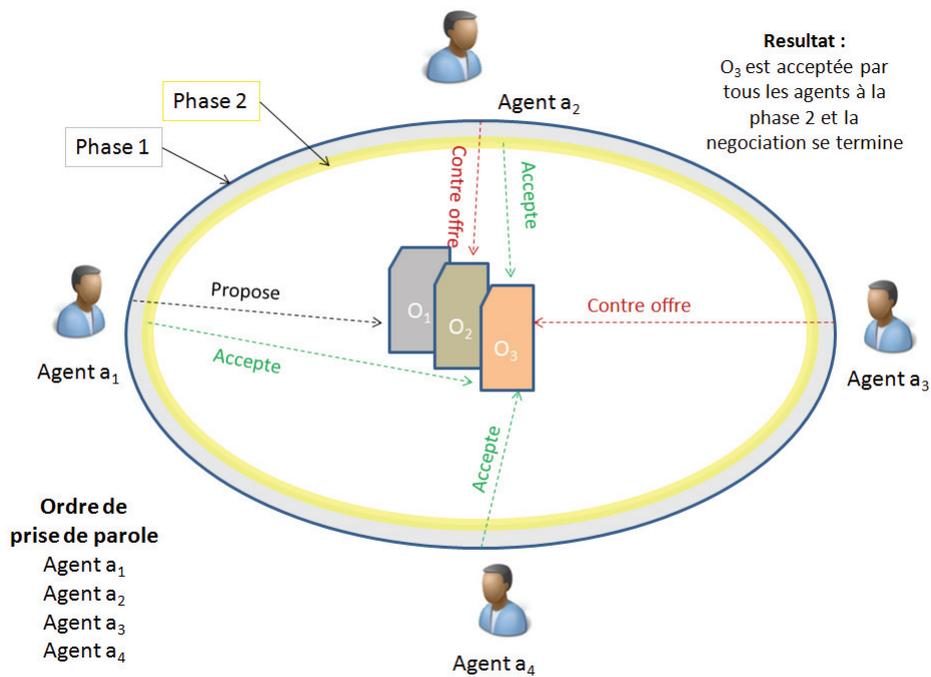


FIGURE 2.1: Stacked Alternating Offers Protocol

Dans le protocole AMOP, tous les agents soumettent séquentiellement leurs offres. Ensuite, chacun vote pour toutes les offres, il peut accepter ou rejeter chaque offre (voir Figure 2.2). Dans ce protocole, chaque agent a une visibilité entière de l'espace des solutions. Il peut voir les avis de tous les agents par rapport à ses offres, et peut évaluer celles des autres à la différence du protocole SAOP. Cependant, ce protocole est très coûteux en termes de coût de messages comparé à SAOP. Le processus de raisonnement des agents devient plus complexe car les agents doivent évaluer toutes les offres en même temps et prendre des décisions pour chacune de ces offres. Dans un contexte de négociation multilatérale avec de multiples attributs où chaque agent peut s'intéresser seulement à une partie des attributs, l'agent sera amené à traiter des offres qui ne correspondent pas à ses besoins. Par conséquent, cela peut amener les agents à faire des traitements inutiles.

#### IV. La théorie du bien-être social

Le bien-être au sens large est un état de bonheur ou de satisfaction par rapport à une situation donnée. En sciences économiques, le concept du bien-être trouve son origine dans les travaux de Wilfredo Pareto, Arthur Pigou et Jeremy Benham<sup>4</sup> [13].

4. Jeremy Bentham né le 15 février 1748 à Londres et mort dans cette même ville le 6 juin 1832 est un philosophe, juriste et réformateur britannique

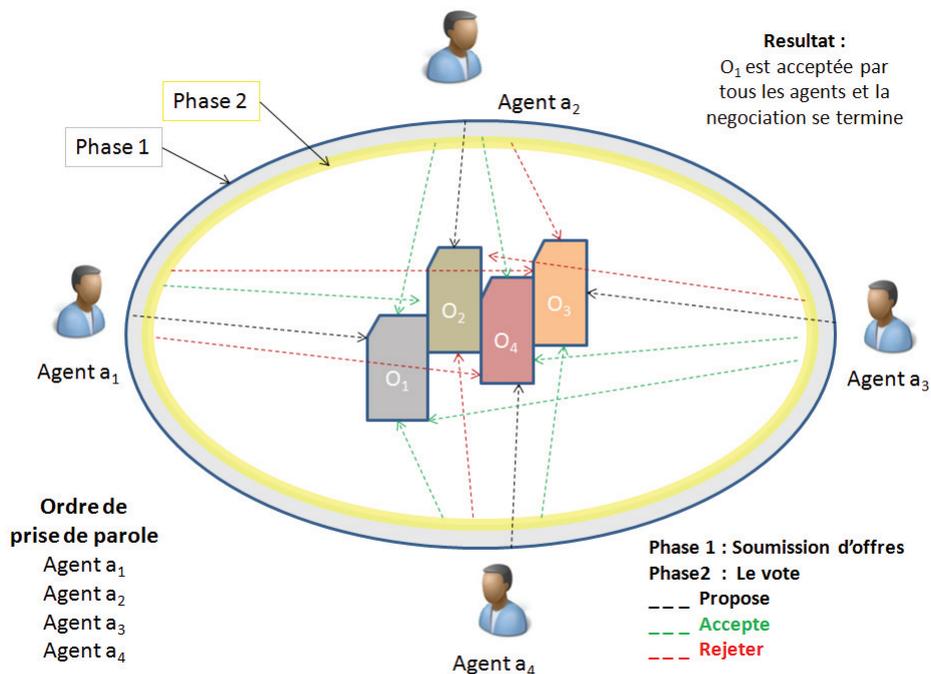


FIGURE 2.2: Alternating Multiple Offers Protocol

La théorie du bien-être social est largement étudiée dans les sciences sociales et en économie. C'est une branche qui étudie les différents états de l'économie concernant la répartition des ressources et des revenus entre les individus d'une société. Elle s'intéresse à la mesure du bien-être social, c'est-à-dire, le niveau de satisfaction atteint par les individus. Il existe dans la littérature plusieurs concepts de bien-être dont les plus connus sont l'optimum de Pareto, le critère utilitariste, et le critère égalitariste.

*l'optimum de Pareto* : Il s'agit d'une allocation des ressources pour laquelle il n'existe pas une alternative dans laquelle tous les agents seraient dans une situation meilleure. Il décrit l'état d'une société où il n'est pas possible d'augmenter le bien-être d'un individu sans réduire celui d'un autre [73].

Le critère de Pareto appelé aussi le principe d'efficacité présente cependant plusieurs limitations. Il peut exister plusieurs optima de Pareto non comparables et aussi ce critère ne garantit pas toujours un choix satisfaisant et juste du point de vue social. Autrement dit, il ne garantit pas forcément une distribution équitable du bien-être entre les individus. Par exemple, une société dont tous les biens appartiennent à une seule personne est un optimum de Pareto

*Le critère utilitariste* : Il s'appuie sur le concept d'utilité introduit par Jeremy

Bentham [13]. L'utilité est une valeur numérique qui représente le bonheur ou le bien-être d'un individu ou de tous (bien-être social) pour une situation donnée. Le bien-être utilitaire se mesure par la somme des utilités de tous les agents. Le problème réside, premièrement, dans la comparaison des utilités des agents lorsque chacun de ces agents définit sa propre fonction d'utilité et avec sa propre échelle. Deuxièmement, ce type de bien-être ne prend pas en compte la distribution des biens entre les agents.

*Le critère d'égalitarisme* : Le principe d'égalitarisme de John Rawls [81] s'appuie sur deux principes : l'égalité des chances et le principe de différence. La fonction de bien-être de Rawls appelée *maxmin* indique que le bien-être social d'une allocation dépend uniquement du bien-être de l'individu qui a le niveau de satisfaction le plus bas, c'est-à-dire, la personne avec l'utilité minimum.

Dans la plupart des modèles de négociation proposés, par exemple, dans un contexte d'allocation de ressources[71, 87], le concept du bien-être social est mis en œuvre pour évaluer les différentes possibilités de partage de ressources. Dans un contexte de prise de décision collective, le bien-être social des individus est calculé généralement selon le critère utilitarisme. Dans le cadre de cette thèse, nous définissons un nouveau concept de solution pour une négociation équitable et juste. Ainsi, nous nous basons sur le principe égalitarisme de Rawls pour proposer une nouvelle méthode d'évaluation des solutions de la négociation pour garantir un choix unique et juste.

## V. Positionnement de la thèse

Dans le cadre de cette thèse, nous abordons la prise de décision collective dans un contexte où les agents construisent eux-mêmes la solution à leur problème à travers leurs échanges de propositions et contre-propositions. Ce contexte est différent de celui des systèmes de vote dans lesquels les électeurs expriment leurs opinions sur un ensemble de solutions prédéfinies. Dans les mécanismes de négociation que nous proposons, l'espace des solutions possibles n'est pas connu par tous les agents, chaque agent a connaissance de ses propres propositions et ne découvre celles des autres que pendant leurs interactions. Nous nous positionnons dans un contexte où les agents ont des intérêts divergents et sont égoïstes. Une décision collective dans un tel contexte s'effectue par consensus. Chaque agent peut soumettre une proposition et donne son opinion sur celles qu'on lui soumet. Il peut soit accepter, soit refuser toute proposition reçue. Des techniques de persuasion peuvent aussi être utilisées pour permettre à chaque

agent de convaincre les autres à agir d'une certaine manière.

Les modèles de négociation proposés dans cette thèse s'appuient sur une approche décentralisée et distribuée.

Nous entendons par une négociation décentralisée le fait que les agents interagissent sans avoir recours à un médiateur. En fait, le problème des mécanismes de négociation avec médiateur réside, d'une part, dans leur structure centralisée et les offres suggérées par ce médiateur ne satisfont pas toujours tous les agents. D'autre part, il peut être difficile de concevoir un agent médiateur capable de coordonner efficacement toutes les interactions lorsque les nombres d'agents et d'attributs à négocier sont importants. Pour s'attaquer à ces problèmes, nous proposons des mécanismes de négociation dans lesquels les agents gèrent eux-mêmes leurs interactions. Ils négocient selon leurs propres croyances en suivant les règles du protocole que nous proposons.

Nous entendons par une négociation distribuée le fait que les agents sont répartis dans plusieurs groupes. Dans la plupart des modèles de négociation multilatérale tels que ceux fondés sur les protocoles des offres alternées [7], les agents négocient autour d'une "seule table". Dans ces modèles, la négociation devient très complexe lorsque les nombres d'agents et d'attributs à négocier sont importants. Le raisonnement des agents peut être complexe lorsqu'ils doivent évaluer en même temps toutes les propositions soumises par les autres agents. Dans un contexte de négociation multi-attributs où tous les agents ne s'intéressent pas nécessairement à tous les attributs, les agents peuvent effectuer des traitements inutiles en recevant des offres qui ne correspondent pas à leurs besoins. Pour pallier ces difficultés, nous proposons une approche innovante qui s'appuie sur le principe du "diviser pour régner". Les mécanismes de négociation proposés consistent à diviser les agents en plusieurs groupes. Les négociations s'effectuent simultanément dans chaque groupe et les agents construisent des solutions partielles de façon totalement décentralisée. Une solution partielle peut être une proposition acceptée par une partie des agents ou portant sur une partie des attributs à négocier. L'objectif de notre approche est de limiter les champs d'interaction des agents afin de réduire la complexité de leur raisonnement et de faciliter la recherche d'accords.

L'objectif de ce travail de thèse est d'étudier des mécanismes de négociation qui peuvent s'adapter dans plusieurs contextes applicatifs notamment dans les systèmes distribués. Cependant, un autre aspect qui retient notre attention est l'évaluation de la solution finale de négociation. Il s'agit de trouver les critères

d'évaluation qui permettent de garantir un choix social juste et équitable.

Les méthodes d'agrégation des préférences des agents et les critères de choix social largement étudiés dans la théorie du vote, dans les sciences sociales et dans la théorie de décision trouvent tout leur intérêt dans les négociations pour la prise de décision collective. Il a été montré dans la littérature qu'il existe plusieurs paradoxes dans les scrutins de vote et les règles de choix final établies. Par exemple, le paradoxe de Condorcet [39] montre une certaine incohérence qui peut exister lorsqu'un mode de scrutin utilise la règle de la majorité populaire. Le choix final ne reflète pas toujours les préférences des électeurs. Ainsi, l'utilisation seulement de la règle de majorité dans une négociation peut être insuffisante pour garantir une solution équitable et juste.

La plupart des travaux sur les mécanismes de négociation évaluent le bien-être social des agents par rapport à une solution. Ce bien-être social que nous appelons ici la satisfaction sociale peut être mesuré par la somme ou le produit des utilités individuelles des agents. Cependant, le problème de ces méthodes d'évaluation du bien-être social réside dans le fait que les agents peuvent avoir des fonctions d'utilité différentes et qui sont définies sur des échelles différentes. Dans ce cas, la comparaison des utilités des agents concernant une offre n'aura pas de sens.

Pour limiter ces inconvénients, nous proposons une nouvelle méthode d'évaluation qui consiste à combiner plusieurs critères d'évaluations tels que :

- le taux d'acceptation de la solution.
- la satisfaction sociale des agents par rapport à la solution.
- la valeur de support de la solution qui représente le rapport entre le taux de refus et d'acceptations.
- l'estampille de la solution, c'est-à-dire, la date d'obtention du taux d'acceptation majoritaire.

Ces critères sont utilisés de façon hiérarchique pour classer l'ensemble des proposition majoritaires (i.e., acceptables) afin d'établir un choix unique équitable et juste.

Pour apporter une solution aux problèmes que pose la comparaison des utilités des

agents, nous proposons une nouvelle fonction de satisfaction sociale qui s'appuie sur le principe égalitariste de Jhon Rawls. L'originalité de cette fonction est le fait qu'elle se base sur les scores individuels des agents. Le score qu'un agent donne à une proposition représente son degré de satisfaction. Sa valeur dépend de l'écart entre l'utilité de l'offre et celle que l'agent souhaiterait atteindre, c'est-à-dire son aspiration.

## **VI. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les travaux concernant les mécanismes de coordination multi-agents notamment les systèmes de vote et de négociation. Ces derniers sont deux méthodes de prise de décision collective. Nous avons d'abord analysé les différents systèmes de vote existants ainsi que leurs méthodes d'agrégation des préférences individuelles des électeurs afin de faire un choix collectif. Ensuite, nous avons présenté les différentes approches utilisées pour aborder la négociation multi-agents, leurs avantages, leurs inconvénients ainsi que les modèles existants.

# Chapitre 3

## **MÉCANISME DE NÉGOCIATION MULTILATÉRALE : APPROCHE "DIVISER POUR RÉGNER"**

*Dans ce chapitre, nous abordons la négociation multilatérale dans laquelle des agents égoïstes négocient sur un seul attribut dans un temps limité. Nous proposons un nouveau modèle de négociation multilatérale dans lequel l'interaction des agents est totalement décentralisée. Le protocole proposé s'inspire du principe du diviser pour régner. Les agents sont répartis en plusieurs groupes appelés anneaux dans lesquels ils échangent leurs propositions. Nous proposons des politiques d'interaction permettant la communication entre des agents appartenant à des anneaux différents. À travers cette approche distributive, nous cherchons à limiter les champs d'interaction des agents pour réduire la complexité de raisonnement des agents et faciliter la recherche d'accords collectifs. Nous avons évalué les performances de notre protocole en le comparant à une approche centralisée.*

## I. Introduction

La négociation multilatérale est un processus d'échange qui permet aux participants ayant des intérêts différents pour la réalisation d'un but commun, de construire ensemble des solutions collectivement satisfaisantes. Dans la pratique, ces participants ont le plus souvent un comportement égoïste et ne partagent pas les informations concernant leur fonction d'utilité. Chacun tente de conduire la négociation vers un accord qui satisfait au mieux ses objectifs. Dans ce contexte, la négociation devient très complexe lorsque le nombre de participants est important à la différence d'une négociation bilatérale qui n'implique que deux participants.

La mise en place des mécanismes de négociation multilatérale qui permettent aux participants d'arriver plus facilement à trouver des accords collectifs nécessite la prise en compte de tous les aspects inhérents à la négociation. La plupart des travaux effectués sur la négociation multilatérale ne fournissent pas de protocoles spécifiques, ou s'appuient sur des hypothèses difficilement applicables dans un contexte réel. Certains étendent les mécanismes proposés pour le cas d'une négociation bilatérale. Par exemple, [29] propose une généralisation du protocole de concession monotone [86] pour la négociation multilatérale. D'autres mécanismes de négociation multilatérale désignent un médiateur qui se charge de superviser les interactions, de détecter les conflits entre les parties négociatrices et de suggérer des offres [53, 8].

Le problème de ces protocoles de négociation avec médiateur réside dans leur structure centralisée. Ils ne garantissent pas toujours une solution collectivement satisfaisante. Ainsi, notre objectif est de proposer des protocoles de négociation applicables dans un contexte réel et qui permettent aux agents de construire des solutions collectives de façon totalement décentralisée.

Dans ce travail, nous abordons la négociation multilatérale en nous appuyant sur les hypothèses suivantes :

- 1 Les agents négocient sur un seul attribut et doivent trouver à la fin de la négociation une solution collective et acceptable.
- 2 Les agents sont égoïstes et chacun cherche à défendre ses propres intérêts.
- 3 Les agents ne partagent pas leur fonction d'utilité.

4 La négociation s'effectue sans médiateur, les agents interagissent entre eux de façon totalement décentralisée.

5 La négociation s'effectue sur une durée limitée.

L'automatisation de telles négociations nécessite la mise en place de protocoles spécifiques pour faciliter la prise de décision et la définition de nouveaux concepts de solution pour une négociation équitable et collectivement satisfaisante.

Dans ce chapitre, nous présentons un mécanisme de négociation fondé sur une approche incrémentale et itérative. L'objectif est d'une part, de distribuer la négociation, et d'autre part, d'appréhender la complexité du raisonnement des agents et de faciliter la convergence de la négociation. Ainsi, nous nous intéressons d'abord à l'organisation du système multi-agents car elle peut significativement affecter la complexité de la recherche d'accords, la flexibilité, la réactivité et peut induire des surcoûts de calcul et de communication [46, 95]. Ensuite, nous définissons différentes politiques d'interaction qui s'adaptent aux modèles d'organisation des agents proposés. Nous proposons aussi différentes stratégies de négociation qui permettent aux agents de prendre des décisions qui répondent au mieux à leurs objectifs. La section suivante présente de manière générale l'approche proposée.

## II. Approche générale

Le mécanisme de négociation que nous proposons se fonde sur le principe du "*diviser pour régner*". Le terme "*diviser pour régner*" est à l'origine défini comme une stratégie qui consiste à semer la discorde et à opposer les éléments d'un ensemble donné pour les affaiblir et les influencer, ce qui n'aurait pas été possible si l'ensemble était uni. En informatique, "*diviser pour régner*" est une technique de résolution de problème qui permet de trouver une solution efficace avec moins de traitements. Il consiste à faire un découpage des données puis à effectuer des sous traitements sur les sous problèmes pour mieux combiner ensuite les solutions partielles obtenues. Cette technique de résolution de problèmes trouve aussi son intérêt dans les négociations économiques et politiques. "*Diviser pour régner*" est défini en économie et en politique comme une stratégie de négociation qui consiste à mettre en lumière les contradictions et les désaccords au sein de la partie adverse de façon à la diviser et à affaiblir sa capacité à négocier [110]. Mais sur le plan économique et politique cette stratégie peut prendre la forme d'une technique de résolution de problèmes.

À titre d'exemple, prenons le cas de la COP21 lors des négociations pour la recherche de solutions concernant le réchauffement climatique en 2015 [105]. Lors de ces négociations, les échanges s'effectuaient de la plus grande échelle (les séances plénières) à la plus petite échelle (dans un cadre plus restreint). En aparté, les pays négociateurs formaient ce que l'on appelle des "*groupes de contact*" dans lesquels les membres de chaque groupe discutaient sur les aspects qui les intéressent. Les séances plénières permettent d'entériner un accord collectif concernant les pays participants et l'union européenne.

Le mécanisme de négociation proposé consiste d'abord à répartir les agents en petits groupes disjoints appelés anneaux. Notons qu'il ne s'agit pas ici de subdiviser le problème à traiter en sous-problèmes mais de diviser l'ensemble des agents en sous-ensembles. Chaque sous-ensemble d'agents constitue un anneau dans lequel les membres discutent sur le même problème pour construire des ébauches de solutions. L'objectif de cette approche distributive consiste à limiter la complexité de la négociation ainsi que la charge cognitive des agents pour traiter les différentes alternatives et faire des compromis. Cependant, pour rendre la négociation flexible, nous proposons des politiques d'interaction inter-anneaux fondées sur l'écoute flottante. Chaque agent peut écouter les échanges qui s'effectuent dans les autres anneaux afin de prendre connaissance des propositions qui y sont soumises. Il peut ensuite donner son avis sur les propositions qu'il a écoutées.

Par ailleurs, au cours de la négociation, un agent peut décider de rejoindre un autre anneau pour défendre ses propositions. Son objectif est de convaincre la majorité des agents à accepter ses propositions. Dans ce contexte, l'approche "*diviser pour régner*" prend la forme d'une stratégie de négociation. Elle consiste pour un agent à tirer profit des divergences au sein des autres anneaux pour mettre en avant ses propositions.

Les interactions entre les agents sont régies par des règles et des politiques d'interaction spécifiques que nous proposons (section V.).

### III. Présentation du modèle

#### 1 Exemple de scénario

Pour illustrer notre mécanisme de négociation, nous considérons un scénario de négociation basé sur un projet de mise en place d'une nouvelle ligne de tramway

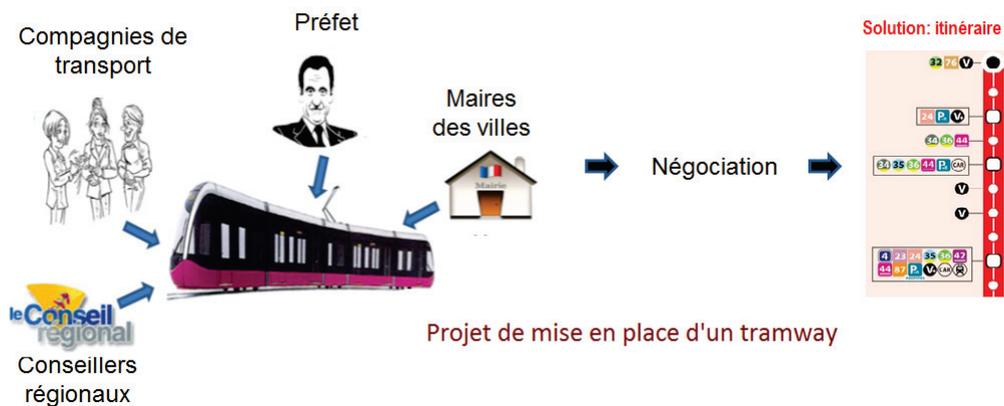


FIGURE 3.1: Négociation pour définir les coordonnées des arrêts d'un tramway

pour une agglomération ( Figure 3.1). Ce projet implique par exemple, les maires des communes concernées, le préfet de la région, les conseillers régionaux et les compagnies de transports. Leur but est de déterminer le tracé de la nouvelle ligne de tramway, c'est-à-dire, les coordonnées de ses arrêts. Ces participants peuvent avoir des intérêts divergents. Par exemple, le but des maires est d'optimiser le coût de financement du projet et la desserte des établissements publics. Ils préféreraient que la ligne desserve plusieurs communes. Le préfet peut s'intéresser à la sécurité des personnes. Il préférera que certains arrêts soient proches des postes de police. Les conseillers régionaux peuvent aussi s'intéresser à la desserte des établissements publics tels que les lycées. Quant aux compagnies de transport, leur but est que les arrêts soient proches des stations de métro et de bus pour faciliter les correspondances. Dans ce cas de figure, chaque participant suggérera une proposition d'itinéraire qui répond à ses objectifs. Dans un contexte réel, ces participants peuvent avoir des importances différentes dans la prise de décision. Par exemple, la décision des maires peut être plus importante que celle des représentants d'une compagnie de transport.

## 2 Modèle proposé

Le mécanisme de négociation proposé consiste à structurer les agents en petits groupes appelés anneaux. Dans chaque anneau, les agents s'échangent leurs propositions et leurs avis. La négociation s'effectue simultanément au sein de chaque anneau et plus tard entre anneaux selon la politique d'interaction proposée. Au sein de chaque anneau, les agents soumettent leurs propositions (offres), reçoivent celles des autres et ensuite les évaluent. Un agent peut accepter, refuser, renforcer ou attaquer une proposition soumise par un autre agent. La négociation s'effectue de manière décentralisée sans médiation. Les agents décident eux-mêmes

de leurs propositions et réagissent avec les autres selon leurs propres croyances tout en respectant les règles du protocole. Il n'existe aucun ordre prédéfini pour les agents pour participer à la négociation. Chaque proposition soumise par un agent est une suggestion de solution de négociation. Elle devient une *solution acceptable* si elle est acceptée par *la majorité* des agents du système.

Le protocole permet aux agents qui le souhaitent de prendre connaissance via l'écoute flottante des interactions qui s'effectuent dans les autres anneaux. Cela permet aux agents d'appréhender les négociations menées au-delà de leur anneau. Ainsi, un agent peut réagir sur les propositions écoutées tout en restant dans son anneau. Comme il peut décider de rejoindre un autre anneau où ses intérêts seront mieux défendus. Cependant, les agents utilisent différentes stratégies pour choisir le meilleur anneau qu'ils vont rejoindre s'ils en écoutent plus d'un. Lorsqu'un agent se déplace dans un nouvel anneau, il peut soit soumettre de nouvelles propositions, soit défendre ses propositions ayant déjà obtenu un certain taux d'acceptation en vue d'atteindre la majorité. Les déplacements des agents d'un anneau à un autre sont régis par les règles du protocole.

La négociation s'effectue en un temps limité et en plusieurs tours séparés par des points de contrôle. Ces derniers permettent d'évaluer après chaque tour de négociation les échanges effectués et de vérifier si un accord a été trouvé. À l'issue d'un point de contrôle, une solution peut être trouvée, sinon une autre phase de négociation est effectuée si le temps imparti à la négociation n'a pas expiré. Nous considérons qu'une solution de négociation est trouvée lorsqu'une proposition est acceptée par la majorité des agents. Le temps de la négociation est fixé et les points de contrôle sont effectués à des périodes régulières prédéfinies.

En résumé, notre modèle de négociation se déroule en trois phases :

**Phase 1** est la répartition initiale des agents dans les anneaux. Elle peut se faire soit aléatoirement soit stratégiquement, c'est-à-dire en se basant sur le poids des agents.

**Phase 2** est la négociation proprement dite. Les agents formulent et soumettent leurs propositions. Ils reçoivent celles des autres et prennent des décisions. Ils peuvent migrer vers d'autres anneaux pour mieux défendre leurs propositions.

**Phase 3** est le point de contrôle. Il consiste à vérifier s'il existe des propositions dont les taux d'acceptation ont atteint le seuil de la majorité fixé. Ces

propositions sont dites : *solutions acceptables*.

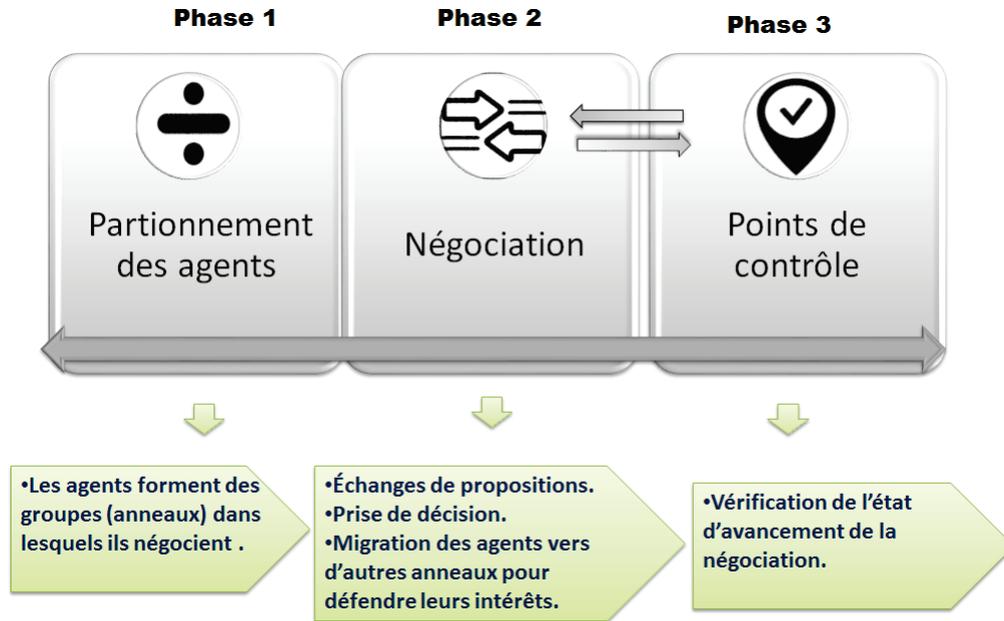


FIGURE 3.2: Les différentes phases du mécanisme de négociation proposé

## IV. Cadre de la négociation

Soient  $\mathcal{A} = \{a_1, \dots, a_n\}$  l'ensemble des agents participant à la négociation et  $\mathcal{G} = \{g_1, \dots, g_m\}$  l'ensemble des anneaux dans lesquels les agents vont négocier. Chaque  $a_i$  a un poids  $w_{a_i} \in [0, 1]$  qui représente son importance dans la prise de décision. Chaque agent possède un ensemble de propositions  $\mathcal{P}_{a_i}$  qu'il peut soumettre et une fonction d'utilité  $u_{a_i} \in [0, 1]$  lui permettant d'évaluer les propositions des autres agents.

### 1 Fonction d'utilité et Aspirations :

Soit  $\mathcal{X} = \{x_1, \dots, x_r\}$  l'ensemble des critères pour évaluer une proposition. Chaque agent  $a_i$  possède un sous-ensemble de critères  $\mathcal{X}_i \subseteq \mathcal{X}$  avec lesquels il définit sa fonction d'utilité.

**EXEMPLE 5** Dans le scénario de négociation pour la mise en place d'une ligne de tramway, construire une proposition consiste à définir les coordonnées des arrêts de la ligne de tramway. Le positionnement des arrêts permet de déterminer les communes et les établissements publics desservis par le tramway, et les correspondances. Ainsi, nous désignons par  $x_1, x_2, x_3$  respectivement le nombre de communes desservies, le nombre

de services publics desservis, et le nombre de correspondances. Ces trois critères sont utilisés par les agents pour évaluer une proposition. Cependant, chaque agent choisit, selon ses besoins, les critères qu'il utilise pour évaluer les propositions qu'on lui soumet. Par exemple, un maire d'une commune peut évaluer une proposition selon le nombre de communes desservies car cela influe sur sa contribution financière pour le projet et selon aussi le nombre d'établissements publics desservis. Ainsi, sa fonction d'utilité est multi-critères et les critères sont :  $x_1$  et  $x_2$ . Les conseillers régionaux quant à eux visent la desserte des institutions publiques. Leur fonction d'utilité est mono-critère et le critère utilisé est  $x_2$ . Les représentants des compagnies de transport s'intéressent au nombre de correspondances. Leur fonction d'utilité est définie selon le critère  $x_3$ .

L'objectif de chaque agent est de maximiser son utilité mais à un certain moment de la négociation, il peut être appelé à faire des concessions pour établir un compromis avec les autres agents. Ainsi, chaque agent fixe ses aspirations représentées ici par l'utilité minimale  $U_{min_{a_i}}$  qu'il peut espérer, autrement dit son utilité de réserve en dessous de laquelle aucune proposition n'est acceptable, et l'utilité maximale  $U_{max_{a_i}}$  en dessus de laquelle toute proposition est acceptable. Lorsque l'utilité d'une proposition se trouve entre  $U_{min_{a_i}}$  et  $U_{max_{a_i}}$ , l'acceptation de cette proposition dépend des stratégies de concession de l'agent. Nous rappelons que dans le protocole proposé, les agents négocient sur une base d'informations incomplètes dont ils disposent. Les fonctions d'utilités sont des informations privées. Chaque agent génère ses propositions et fixe ses aspirations en se basant sur ses propres connaissances qui sont souvent limitées. Cependant, au cours de ses échanges avec les autres agents, il peut recevoir des propositions qui peuvent être au-delà de ses aspirations.

**EXEMPLE 6** *Supposons qu'un vendeur et un acheteur négocient sur le prix d'un article  $x$ . Le vendeur fixe son prix de réserve à 40 euros (information privée), son objectif est de vendre l'article à 60 euros mais il ne connaît pas la valeur que l'acheteur accorde à l'article et le prix qu'il est prêt à lui offrir. Ainsi, le vendeur définit selon ses aspirations  $U_{min} = 40$  euros,  $U_{max} = 60$  euros. Sa stratégie de prise de décision est la suivante : "je n'accepte en aucun cas une offre en dessous de 40 euros, je n'accepte que des offres supérieures ou égale à 60 euros, mais si au bout d'un certain temps je ne trouve pas une offre supérieure ou égale à 60 euros, je peux concéder en acceptant une offre comprise entre 40 euros et 60 euros".*

## 2 Actes de communication :

Soit  $\mathcal{O} = \{ Propose, Accepte, Refuse, Renforce, Attaque \}$  l'ensemble des actes du langage que les agents utilisent pour interagir entre eux. Ces actes sont formalisées

comme suit :

- **Propose**( $a_i, \mathcal{A}g_k, p_\alpha^i, argp_\alpha^{i+}$ ) : l'agent  $a_i \in \mathcal{A}g_k$  soumet une proposition  $p_\alpha^i$  avec un ensemble d'arguments positifs  $argp_\alpha^{i+} \subseteq \mathcal{A}rgp_\alpha^{i+}$  à tout agent  $a_j \in \mathcal{A}g_k$ .
- **Accepte**( $a_i, \mathcal{A}g_k, p_\alpha^r$ ) : l'agent  $a_i \in \mathcal{A}$  accepte la proposition  $p_\alpha^r$  soumise par  $a_r \in \mathcal{A}g_k$  et envoie un message à tout agent  $a_j \in \mathcal{A}g_k$ .
- **Refuse**( $a_i, \mathcal{A}g_k, p_\alpha^r$ ) : l'agent  $a_i \in \mathcal{A}$  refuse la proposition  $p_\alpha^r$  soumise par  $a_r \in \mathcal{A}g_k$  et envoie un message à tout  $a_j \in \mathcal{A}g_k$ .
- **Attaque-Proposition**( $a_i, \mathcal{A}g_k, p_\alpha^r, argp_\alpha^{r-}$ ) : l'agent  $a_i \in \mathcal{A}$  attaque la proposition  $p_\alpha^r$  soumise par  $a_r \in \mathcal{A}g_k$  et envoie un message à tout  $a_j \in \mathcal{A}g_k$  avec un ensemble d'arguments négatifs  $argp_\alpha^{r-} \subseteq \mathcal{A}rgp_\alpha^{r-}$ .
- **Renforce-Proposition**( $a_i, \mathcal{A}g_k, p_\alpha^r, argp_\alpha^{r+}$ ) : l'agent  $a_i \in \mathcal{A}$  renforce la proposition  $p_\alpha^r$  soumise par  $a_r \in \mathcal{A}g_k$  et envoie un message à tout  $a_j \in \mathcal{A}g_k$ , avec un ensemble d'arguments positifs  $argp_\alpha^{r+} \subseteq \mathcal{A}rgp_\alpha^{r+}$ .

$p_\alpha^i$  signifie que la proposition  $p_\alpha$  est soumise par  $a_i$ . Chaque proposition  $p_\alpha$  soumise par un agent est associée à un tuple  $(\mathcal{T}_{p_\alpha}^{ac}, \mathcal{T}_{p_\alpha}^{re}, \mathcal{T}_{p_\alpha}^{rf}, \mathcal{T}_{p_\alpha}^{at}, \nu_{p_\alpha}, ws(p_\alpha), \epsilon_{p_\alpha})$  dont les éléments représentent, respectivement, le taux d'acceptation, le taux de renforcement, le taux de refus, le taux d'attaque, sa valeur de support avec  $\nu_{p_\alpha} = \frac{\mathcal{T}_{p_\alpha}^{ac} + \mathcal{T}_{p_\alpha}^{re}}{\mathcal{T}_{p_\alpha}^{rf} + \mathcal{T}_{p_\alpha}^{at} + 1}$ , sa valeur de satisfaction sociale détaillée dans la section 3 et son estampille. Les taux ci-dessus sont calculés par rapport au nombre d'agents dans le système. Par exemple,  $\mathcal{T}_{p_\alpha}^{ac}$  est le rapport entre le nombre d'acceptations et le nombre d'agents  $n$ . Formellement  $\mathcal{T}_{p_\alpha}^{ac} = \frac{|a_{p_\alpha}^{ac}|}{n}$  avec  $|a_{p_\alpha}^{ac}|$  le nombre d'agents qui ont accepté la proposition  $p_\alpha$ . Les taux de renforcement, d'attaque, et de refus sont calculés de la même façon.

Le mécanisme de négociation proposé relève des modèles de négociation fondés sur l'approche heuristique. Généralement il n'existe pas de stratégie dominante pour ces modèles. Il s'agit alors pour chaque agent de découvrir de manière heuristique les meilleures offres et quand les soumettre. Afin d'améliorer l'efficacité de la recherche d'accords, nous utilisons un cadre d'argumentation. Les agents peuvent appuyer leurs propositions par des arguments ainsi que leurs décisions sur les offres qu'ils reçoivent. Les arguments peuvent être positifs ou négatifs. Ces arguments permettent respectivement d'influencer les autres agents à accepter une offre ou les dissuader et donc à refuser une offre.

## V. Protocole de négociation

Nous désignons par  $\{r_1, \dots, r_Q\}$  l'ensemble des tours de négociation, par  $\{C_{pt_1}, \dots, C_{pt_Q}\}$  l'ensemble des points de contrôle. Chaque tour  $r_q$  de négociation est suivi d'une phase de contrôle  $C_{pt_q}$ . La négociation s'effectue pendant une durée limitée  $d_l$  mais elle peut prendre fin après n'importe quel point de contrôle lorsqu'il existe une solution. Cela signifie qu'elle s'arrête dès qu'une solution est trouvée avant même que le temps de la négociation soit expiré. Sinon tant qu'aucune solution n'est trouvée, la négociation se poursuit jusqu'à la date limite.

Le choix de la règle de la majorité est justifié par le fait que nous considérons les négociations impliquant un nombre important d'agents dans lesquelles l'application de la règle de l'unanimité rend plus difficile la recherche d'accords collectifs. Dans le mécanisme proposé, un seuil de majorité noté  $\phi_{maj}$  est défini. Toute proposition dont le taux d'acceptation est supérieur ou égal à  $\phi_{maj}$  est une solution de négociation acceptable.

Fixer une date limite de négociation peut aussi aider à accélérer l'établissement d'accords. Le plus souvent, les participants peuvent faire plus de concessions à l'approche de la date limite. De plus, la plupart des négociations réelles nécessitent des délais de mise en place d'une solution.

Nous détaillons dans les sections suivantes les stratégies de négociation des agents en fonction de leurs aspirations, et les critères de choix d'une solution de négociation juste et équitable.

### 1 Stratégies et tactiques de négociation

Les agents négocient sur la base des objectifs qu'ils souhaitent atteindre à la fin de la négociation, désignés ici par le terme *aspiration*. L'aspiration d'un agent désigne la valeur d'utilité qu'il estime obtenir de la solution finale de négociation. Dans ce protocole, pour faciliter l'obtention d'une solution de négociation, nous incitons les agents à avoir une certaine flexibilité sur leurs aspirations. Au début de la négociation, chaque agent  $a_i$  définit sa zone d'accords possibles, désignée ici par l'intervalle  $[U_{min_{a_i}}, U_{max_{a_i}}]$ , c'est-à-dire l'intervalle de valeurs d'utilité acceptables. Lorsque la négociation commence, chaque agent  $a_i$  cherche à satisfaire au maximum son objectif en soumettant ou en n'acceptant que des propositions dont les utilités sont supérieures ou égales à  $U_{max_{a_i}}$ . Au bout d'un certain temps, lorsque l'agent n'atteint pas son premier objectif ( $U_{max_{a_i}}$ ), il doit réviser à la baisse son utilité maximum  $U_{max_{a_i}}$ . Ainsi, l'agent diminue de manière incrémentale et

stratégique ses aspirations selon l'état de ses négociations.

La question qui se pose est alors, à quel moment, et sous quelles conditions, l'agent va diminuer sa valeur d'utilité maximale  $U_{max_{a_i}}$  et de combien ?

### Tactiques de mise-à-jour des aspirations

Chaque agent définit sa tactique pour mettre à jour ses aspirations au cours de la négociation. Nous considérons ici, que la révision à la baisse des aspirations d'un agent dépend des facteurs tels que le temps et le résultat de la négociation qu'il a obtenu, c'est-à-dire le nombre d'acceptations qu'a obtenues la proposition qu'il supporte à cet instant. Une proposition supportée par un agent, peut-être soit sa propre proposition qu'il a soumise, soit une autre proposition qu'il a acceptée. Dans [31, 30] les auteurs présentent différentes familles de tactiques de négociation qui permettent à un agent dans une négociation de calculer à tout moment les offres qu'il va soumettre. Ces tactiques peuvent dépendre de plusieurs critères tels que le temps ou les ressources disponibles.

Dans notre mécanisme de négociation, il s'agit de définir des tactiques permettant à chaque agent  $a_i$  de calculer à chaque tour  $r_q$  de négociation une nouvelle valeur d'utilité  $U_{max_{a_i}}^q$  qu'il espère avoir. Cette valeur est telle que  $U_{min_{a_i}} \leq U_{max_{a_i}}^q \leq U_{max_{a_i}}$ . Cela permet à l'agent de faire des concessions soit en acceptant soit en soumettant des propositions qu'il n'aurait pas acceptées au tour précédent. Un agent  $a_i$  définit une nouvelle zone d'accords possibles lorsqu'il estime que sa proposition courante notée  $p_c(i)$  (acceptée ou soumise) qu'il aimerait comme solution de la négociation, n'a aucune chance d'être acceptée par au moins la majorité des agents une fois la date limite atteinte. Donc la tactique d'un agent  $a_i$  dépend de la façon dont il estime l'évolution du taux d'acceptation d'une proposition  $p$  qui peut avoir la chance d'atteindre au moins le seuil de la majorité  $\phi_{maj}$  à la date limite  $d_l$  de la négociation.

Nous désignons par  $\alpha^p(t)$  une fonction d'estimation de l'évolution du taux d'acceptation d'une proposition  $p$  en fonction du temps  $t$  tel que  $0 \leq \alpha^p(t) \leq 1$ ,  $0 \leq t \leq d_l$ . La fonction  $\alpha^p$  est continue et croissante.  $\alpha^p$  est une fonction qui évolue en fonction du temps. Elle peut être définie de différentes façons, représentant chacune une tactique de négociation. Chaque définition de  $\alpha^p$  est une façon d'estimer l'évolution d'une proposition qui pourrait devenir une solution acceptable de la négociation. Donc cette fonction permet de calculer à chaque tour  $r_q$  de négociation commençant à la date  $t_q$  une valeur  $\alpha^p(t_q)$  que l'agent va comparer avec le taux d'acceptation réel  $\mathcal{T}_{p_c(i)}^{ac}$  de sa proposition courante à cette même date  $t_q$ . À l'issue de cette comparaison, l'agent décidera de réviser ou non

ses aspirations à la baisse.

En fait, cette fonction est un moyen pour guider l'agent dans son processus de concession. Elle permet à l'agent de décider s'il doit continuer à défendre sa proposition courante ou s'il doit diminuer ses aspirations afin d'accepter ou de soumettre de nouvelles propositions.

Dans ce protocole de négociation, nous définissons par exemple  $\alpha^p$  comme suit :

$$\alpha^p(t) = \frac{\phi_{maj}}{d_l} \times t \quad (3.1)$$

$\alpha^p$  est une fonction linéaire, croissante et continue. Nous considérons que les temps des phases de contrôle sont négligeables. Lorsqu'un agent  $a_i$  décide de réviser à la baisse ses aspirations à la date  $t_q$  à laquelle commence le tour  $r_q$  de négociation, il doit savoir de combien il les réduira. Le calcul de la nouvelle valeur d'utilité  $U_{max_{a_i}}^q$  au tour  $r_q$  dépend de l'écart entre le taux d'acceptation de sa proposition courante  $\mathcal{T}_{p_c(i)}^{ac}$ , et le taux  $\alpha^p(t_q)$  qu'il estimait avoir pour prétendre que sa proposition atteigne au moins à la fin de la négociation le seuil de majorité  $\phi_{maj}$ .  $U_{max_{a_i}}^q$  est définie comme suit :

– si  $\alpha^p(t_q) > \mathcal{T}_{p_c(i)}^{ac}$  alors l'agent met à jour ses aspirations

$$U_{max_{a_i}}^q = U_{min_{a_i}} + (U_{max_{a_i}}^{q-1} - U_{min_{a_i}}) \times (1 - (\alpha^p(t_q) - \mathcal{T}_{p_c(i)}^{ac})). \quad (3.2)$$

– si  $\alpha^p(t_q) < \mathcal{T}_{p_c(i)}^{ac}$  alors l'agent maintient ses aspirations

$$U_{max_{a_i}}^q = U_{max_{a_i}}^{q-1}. \quad (3.3)$$

$U_{max_{a_i}}^{q-1}$  est la précédente valeur d'utilité que l'agent souhaitait avoir pendant le tour  $r_{q-1}$ . Au premier tour de la négociation  $r_1$ ,  $U_{max_{a_i}}^1 = U_{max_{a_i}}$ . Au tour  $r_q$ ,  $U_{max_{a_i}}^q$  est recalculée que si  $\alpha^p(t_q) > \mathcal{T}_{p_c(i)}^{ac}$ , sinon l'agent maintient la précédente valeur. Dans ce modèle, pour des raisons de simplification, nous considérons que les agents utilisent la même fonction d'estimation (fonction linéaire) mais chaque agent  $a_i$  définit son propre intervalle de valeurs d'utilité  $[U_{min_{a_i}}, U_{max_{a_i}}]$  qu'il ne partage pas avec les autres agents. Il s'agit d'une information privée. Dans d'autres variantes de ce protocole, les agents peuvent définir leur propre fonction d'estimation en se basant, par exemple, sur leurs propres croyances. Cela peut avoir un impact important sur les résultats de la négociation.

Dans le cadre ce travail de thèse, nous nous sommes limités à un exemple de définition simple de  $\alpha^p$  où nous n'avons considéré que trois paramètres : le seuil de la majorité  $\phi_{maj}$  fixé, la date limite  $d_l$  de la négociation et le temps  $t$ .

Ces paramètres sont des informations publiques et connues par tous les agents. D'autres définitions de  $\alpha^p$  peuvent être suggérées dans d'autres contextes prenant en compte d'autres paramètres relevant des croyances spécifiques à chaque agent.

La suite détaille les stratégies de prise de décision des agents, c'est-à-dire, comment un agent accepte, renforce, refuse, ou attaque une proposition reçue.

### La prise de décision

Une stratégie de négociation permet à un agent de déterminer à chaque instant  $t$  de la négociation la proposition qu'il peut soumettre et les décisions (accepter, refuser, attaquer, renforcer) qu'il peut prendre concernant les propositions reçues. Dans le cadre de notre mécanisme de négociation, un agent prend ses décisions en fonction de ses aspirations  $[U_{min_{a_i}}, U_{max_{a_i}}]$  qu'il peut mettre à jour à chaque tour  $r_q$  de la négociation et aussi en fonction de certaines règles d'interaction. Soit  $p_c(i)$  la proposition courante supportée par un agent  $a_i$ , c'est-à-dire, la dernière proposition qu'il a soumise ou acceptée.

◇ *Accepter une proposition* : un agent  $a_j$  accepte une proposition  $p_i$  d'un autre agent  $a_i$  au tour  $r_q$  de la négociation si  $u_{a_j}(p_i) > u_{a_j}(p_c(j))$ . Ainsi, sa nouvelle proposition courante devient  $p_c(j) = p_i$ . Cependant, nous distinguons deux situations avec des niveaux d'acceptation différents :

- Si  $u_{a_j}(p_i) > U_{max_{a_j}}$  alors il s'agit d'une acceptation accompagnée d'arguments positifs renforçant cette proposition car sa valeur d'utilité est au-delà des attentes de  $a_j$ .
- Si  $U_{max_{a_j}}^q \leq u_{a_j}(p_i) \leq U_{max_{a_j}}$  alors il s'agit d'une acceptation sans argument de renforcement car cette proposition est admise par concession.

**Règle 1** : *Un agent peut accepter plusieurs propositions au cours de la négociation.*

◇ *Refuser une proposition* : un agent  $a_j$  refuse une proposition  $p_i$  d'un autre agent  $a_i$  au tour  $r_q$  de la négociation si  $u_{a_j}(p_i) < u_{max_{a_j}}^q$ . Il refuse et attaque avec des arguments négatifs toute proposition dont l'utilité est inférieure à  $U_{min_{a_j}}$  à n'importe quel tour de négociation.

**Règle 2** : *Un agent ne peut pas refuser une proposition qu'il a déjà acceptée.*

◇ *Soumettre une nouvelle proposition* : un agent  $a_i$  soumet une nouvelle proposition  $p_i$  avec une valeur d'utilité  $U_{max_{a_i}}^q \leq u_{a_i}(p_i) \leq U_{max_{a_i}}^{q-1}$  au tour  $r_q$  de la négociation à l'instant  $\delta_t$ , si le taux d'acceptation  $T_{p_c(i)}^{ac}$  de sa proposition courante

est plus petit que  $\alpha^P(\delta_t)$  et si les taux d'acceptation de toutes les propositions précédentes qu'il a soumises sont inférieurs à  $\alpha^P(\delta_t)$ . Lorsqu'un agent soumet une proposition, il l'accepte implicitement.

## 2 Le degré de satisfaction des agents

La satisfaction d'un agent pour une proposition est désignée ici par une valeur de score qu'il attribue à cette proposition. Cette valeur de score dépend de l'écart entre ses aspirations, c'est-à-dire, les valeurs d'utilité attendues et la valeur d'utilité de la proposition qu'il a acceptée. Le score exprime le degré de satisfaction d'un agent  $a_i$  que nous évaluons selon trois niveaux :

- Lorsque la proposition acceptée est au-delà de l'objectif fixé, c'est-à-dire que son utilité est plus grande que  $U_{max_{a_i}}$ .
- Lorsque la proposition acceptée est dans la zone de concession, c'est-à-dire que son utilité est dans l'intervalle  $[U_{min_{a_i}}, U_{max_{a_i}}]$ .
- Lorsque la proposition est refusée, c'est-à-dire que sa valeur d'utilité est plus petite que  $U_{min_{a_i}}$  ou comprise dans  $[U_{min_{a_i}}, U_{max_{a_i}}^q]$ .

Nous désignons alors trois valeurs de score notées  $\sigma_2, \sigma_1, \sigma_0$  représentant, respectivement, les valeurs de score des trois niveaux mentionnés ci-dessus. Ces valeurs sont telles que  $\sigma_2 > \sigma_1 > \sigma_0 = 0$  et sont des informations publiques, communes à tous les agents.

Notons que chaque agent  $a_i$  définit sa propre fonction d'utilité  $u_{a_i}$  (information privée) et ses seuils d'utilité  $U_{min_{a_i}}, U_{max_{a_i}}$  (informations privées). Les valeurs d'utilité des agents ne sont pas comparables. Par conséquent, deux agents ayant la même valeur d'utilité pour une proposition peuvent avoir des degrés de satisfaction différents. L'exemple de la figure 3.3 montre que l'égalité entre les valeurs d'utilité des agents ne signifie pas qu'ils sont satisfaits de la même façon.

Pour évaluer le résultat de la négociation dans notre mécanisme, nous définissons une nouvelle méthode d'évaluation du bien-être social différente de celles qui s'appuient que sur les valeurs d'utilité des agents. Par exemple, les fonctions de bien-être social de Nash ou utilitariste effectuent respectivement le produit et la somme des utilités individuelles des agents.

## 3 Concept de solution équitable et juste :

La théorie du bien-être est largement étudiée [6] [81]. Elle consiste à trouver des méthodes d'agrégation des préférences individuelles des agents afin d'obtenir

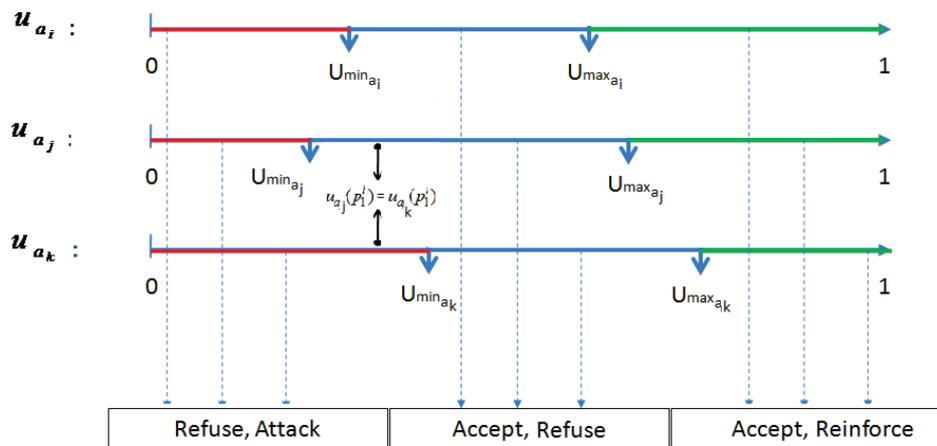


FIGURE 3.3: Sur cette figure, nous représentons trois agents  $a_i, a_j, a_k$  avec leurs seuils d'utilité respectifs. Nous supposons que l'agent  $a_i$  soumet une proposition  $p_i$  aux agents  $a_j$  et  $a_k$ . Chacun de ces derniers évalue la proposition  $p_i$  avec sa propre fonction d'utilité et trouve les mêmes valeurs, c'est-à-dire que,  $u_{a_j}(p_i) = u_{a_k}(p_i)$ . Cependant, les agents  $a_j$  et  $a_k$  ne sont pas satisfait de la même manière car leurs seuils d'utilité sont différents (ils n'ont pas les mêmes aspirations). Le degré de satisfaction de  $a_j$  est  $\sigma_1$  lorsqu'il accepte la proposition. Par contre  $a_k$  va refuser et attaquer la proposition car  $u_{a_k}(p_i) < U_{max_{a_k}}$ . Son degré de satisfaction est égal à  $\sigma_0 = 0$ .

un ordre de préférence sociale. La conception d'une méthode d'agrégation qui satisfait toutes les conditions décrites par Arrow est difficile [6].

Comme le montre *Condorcet*, le vote majoritaire peut ne pas correspondre aux préférences des électeurs. Dans d'autres systèmes de vote tels que le vote par approbation [16], chaque électeur peut voter pour plusieurs candidats. Le candidat gagnant est celui qui obtient le plus grand nombre de voix. [60, 59] considèrent que le vote par approbation peut favoriser le choix du candidat avec un plus grand consensus et l'élection des candidats modérés rejetés par une minorité. Le vote par valeurs consiste à assigner à chaque candidat une valeur de score. Une méthode classique pour déterminer le gagnant est d'effectuer pour chaque candidat la somme des scores individuels de chaque électeur. Le candidat gagnant est celui qui obtient le plus grand score final. Ce système de vote par score est cependant, sensible aux votes stratégiques et ne respecte pas le critère de la majorité. Donc il ne garantit pas l'équité comme recherchée ici. En résumé, chaque système de vote

a ses propres avantages et inconvénients (voir section II.).

Dans ce travail, nous proposons un processus de choix social dans lequel nous considérons un système de vote mixte basé sur le vote par approbation et sur le vote par valeurs afin de combiner les avantages de chacun de ces systèmes de vote et de limiter leurs inconvénients. Ainsi, chaque agent peut accepter toute proposition qu'il préfère comme résultat de la négociation et refuser les autres. Il attribue à chaque proposition une valeur de score correspondant à sa valeur de satisfaction, c'est-à-dire  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  ou  $\sigma_2$ , (cf Section 2). Le score  $\sigma_0$  correspond au refus de la proposition.

Notons que l'utilisation du critère taux d'acceptation majoritaire en tant que seul critère de décision est insuffisante pour faire un choix unique. C'est notamment le cas lorsqu'il existe plusieurs propositions avec le même taux d'acceptation majoritaire. Lorsque nous calculons la satisfaction sociale comme la somme des satisfactions individuelles des agents, la proposition qui a la valeur de satisfaction sociale la plus élevée et la proposition qui a le plus grand nombre d'acceptations ne seront pas toujours les mêmes.

**EXEMPLE 7** Soit  $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$  un ensemble d'agents qui négocient pour prendre une décision collective. Chaque agent  $a_i$  présente sa proposition  $p_\alpha^i$  aux autres agents. Nous présentons dans la colonne  $\sigma_p$  de la table 3.1 les scores que chaque agent donne aux propositions soumises et dans la colonne  $\sum \sigma_{a_i}$  la somme des scores qu'obtient chaque proposition. La colonne  $\mathcal{T}^{ac}$  correspond aux taux d'acceptation de chaque proposition. Ici, les valeurs de score  $\sigma_0 = 0$ ,  $\sigma_1 = 1$  ou  $\sigma_2 = 2$  sont définis par le concepteur. Le seuil de majorité  $\phi_{maj}$  est fixé à 51%.

Au point de contrôle								
Agent	Proposition	$n_{ac}$	$n_{re}$	$n_{at}$	$n_{rf}$	$\mathcal{T}^{ac}$	$\sigma_p$	$\sum \sigma_{a_i}$
$a_1$	$p_1^1$	3	0	0	2	60%	(1,1,1,0,0)	3
$a_2$	$p_2^1$	2	2	1	3	40%	(2,2,0,0,0)	4
$a_3$	$p_3^3$	3	1	0	2	60%	(1,1,2,0,0)	4
$a_4$	$p_4^4$	2	0	0	3	20%	(1,0,0,1,0)	2
$a_5$	$p_5^5$	2	1	0	3	40%	(2,0,0,0,1)	3

TABLE 3.1: Comparaison entre la règle de la majorité et la somme des valeurs de score

La table 3.1 montre la différence des résultats entre la règle de la majorité et la somme des valeurs de score.

Lorsque la règle de la majorité est utilisée, les propositions  $p_1^1$  et  $p_3^3$  sont acceptables car elles sont majoritaires avec un taux d'acceptation égal à 60% (cellules coloriées en vert). L'une des deux propositions  $p_1^1$  et  $p_3^3$  devrait être la solution de la négociation.

Lorsque la somme des valeurs de score est utilisée, les propositions  $p_2^1$  et  $p_3^3$  ont la même valeur de satisfaction sociale et cette valeur est la plus élevée comparée à celles des autres propositions (cellules coloriées en jaune). L'une des deux propositions  $p_2^1$  et  $p_3^3$  devrait être la solution de la négociation.

L'exemple ci-dessus montre bien que la méthode de la somme des scores ne garantit pas toujours le choix de la proposition majoritaire et inversement. La proposition  $p_2^1$  admet la plus grande valeur de satisfaction sociale mais elle n'est pas majoritaire. La proposition  $p_1^1$  est majoritaire mais elle n'admet pas la plus grande valeur de satisfaction sociale.

Ainsi, notre objectif est d'établir de nouveaux critères d'évaluation des propositions afin de garantir le choix d'une solution collective équitable et juste. Dans un premier temps, nous proposons une nouvelle méthode d'agrégation des valeurs de score qui satisfait la règle de la majorité et l'équité. Dans un deuxième temps, nous proposons un nouveau concept de solution basé sur un ensemble de critères utilisés de façon hiérarchique. Le premier critère est la satisfaction sociale de la proposition, le deuxième critère est la valeur de support  $v_p$  de la proposition (cf. section IV.) et le troisième critère est l'estampille  $\epsilon_p$  de la proposition. Ces critères sont utilisés lors d'un point de contrôle pour déterminer la solution finale de la négociation s'il en existe.

### La satisfaction sociale d'une proposition

Nous représentons l'évolution d'une proposition soumise au cours de la négociation par un ensemble d'états successifs  $Sp_\alpha = \{s_0, s_1, \dots, s_q\}$ . Une proposition passe d'un état à un autre à chaque fois qu'un agent l'accepte, la renforce, l'attaque ou la refuse.

L'état  $s_0$  correspond à l'étape de soumission de la proposition, représentant une acceptation implicite de la proposition. Le  $Sp_\alpha$  de chaque proposition  $p_\alpha$  correspond à un profil de satisfaction sociale de  $p_\alpha$  noté  $\sigma_{p_\alpha} = (\sigma_{s_0}, \sigma_{s_1}, \dots, \sigma_{s_q})$ ,  $\sigma_{s_i} \in \{\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2\}$ .

$\sigma_{s_i}$  représente la valeur de satisfaction de l'agent dont l'action a fait passer la proposition de l'état  $s_{i-1}$  à l'état  $s_i$ .

Nous désignons par  $w_s : \mathcal{P} \mapsto \mathbb{R}_+$  la fonction d'agrégation des valeurs de score que nous proposons. Elle attribue une valeur de satisfaction sociale à chaque proposition soumise.  $w_s$  s'inspire du principe de Rawls (*maximim*) [81] qui indique que le bien-être social d'une allocation dépend du bien-être de l'individu qui a le niveau de satisfaction le plus bas.

La fonction  $w_s$  proposée garantit le choix de la proposition qui respecte à la fois la règle de la majorité et celle de l'équité selon Rawls. En effet, maximiser  $w_s$  consiste à minimiser le nombre d'agents ayant une satisfaction nulle, c'est-à-dire, les agents ayant refusé la proposition. Ainsi, la fonction  $w_s$  est définie comme suit :

$$w_s(p_\alpha) = \frac{\sum_{i=0}^q \sigma_{s_i}}{n - n_{ap_\alpha}(s_q)}.$$

$n$  est le nombre d'agents du système,  $n_{ap_\alpha}(s_q)$  désigne le nombre d'agents qui ont accepté la proposition  $p_\alpha$  à l'état  $s_q$  sans prendre en compte l'acceptation implicite de l'agent ayant soumis la proposition. Nous avons donc  $n_{ap_\alpha}(s_q) \leq n - 1$ .

**Proposition 3** *Chaque proposition  $p_\alpha$  soumise a un nombre fini d'états. Le nombre d'états est limité, c'est-à-dire que,  $\exists q_2, q_1$  tel que  $q_1 \leq |Sp_\alpha| \leq q_2$ .*

**Preuve :** Lorsqu'un agent reçoit une proposition, il modifie l'état de cette proposition au moins une fois et au plus trois fois. Ainsi,  $q_2 = 3n - 1$  correspond au cas où tous les agents reçoivent la proposition et agissent trois fois sur la proposition. L'agent qui a soumis la proposition ne peut pas l'attaquer.

**Proposition 4**  *$w_s(p_\alpha, s_i)$  est positive et croissante.*

**Preuve** À l'état  $s_0$ ,  $w_s(p_\alpha, s_0) = \frac{\sigma_{s_0}}{n-1} > 0$ ,  $\sigma_{s_0}$  correspond à la satisfaction de l'agent ayant soumis la proposition  $p_\alpha$ . Chaque état  $s_i \neq s_0$  correspond à une acceptation,

à un renforcement, à un refus, ou à une attaque de  $p_\alpha$ .  $w_s(p_\alpha, s_i) = \frac{\sum_{k=0}^i \sigma_{s_k}}{n - n_{ap_\alpha}(s_i)}$ .

Lorsque  $p_\alpha$  passe de l'état  $s_i$  à l'état  $s_j$  :

si  $s_j$  correspond à un refus, à une attaque, ou à un renforcement alors

$$\sigma_{s_j} = 0, n_{ap_\alpha}(s_j) = n_{ap_\alpha}(s_i) \sum_{k=0}^i \sigma_{s_k} = \sum_{k=0}^j \sigma_{s_k} \Leftrightarrow w_s(p_\alpha, s_j) = w_s(p_\alpha, s_i);$$

si  $s_j$  correspond à une acceptation,  $\sigma_{s_j} > 0$   $\frac{\sum_{k=0}^j \sigma_{s_k}}{n - n_{ap_\alpha}(s_j)} = \frac{\sum_{k=0}^i \sigma_{s_k} + \sigma_{s_j}}{n - (n_{ap_\alpha}(s_i) + 1)} > \frac{\sum_{k=0}^i \sigma_{s_k}}{n - n_{ap_\alpha}(s_i)}$

$$\Leftrightarrow w_s(p_\alpha, s_j) > w_s(p_\alpha, s_i).$$

$w_s(p_\alpha)$  augmente lorsque le nombre d'acceptations de  $p_\alpha$  augmente. Sa valeur maximale est atteinte lorsque  $p_\alpha$  est accepté par tous les agents.

**Proposition 5** *La proposition ayant la plus grande valeur de satisfaction sociale a aussi le taux d'acceptation le plus élevé lorsque  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  prennent certaines valeurs.*

**Preuve** Soit  $f, g, f(k) = \frac{(k+1)\sigma_1}{n-k}, g(k) = \frac{(k+1)\sigma_2}{n-k}$  deux fonctions,  $k \in [1, n-1]$  et  $\mathcal{P}_k$  est l'ensemble des propositions avec un nombre  $k$  d'acceptations.

$$\forall p_\alpha \in \mathcal{P}_k, \forall \sigma_1 \in ]0, \sigma_2[, f(k) \leq w_s(p_\alpha) \leq g(k).$$

$$\forall p_\alpha \in \mathcal{P}_k, p_\beta \in \mathcal{P}_{k+1}, \exists \sigma_1 \in ]0, \sigma_2[ \quad / \quad f(k) \leq w_s(p_\alpha) \leq g(k) < f(k+1) \leq w_s(p_\beta) \leq g(k+1)$$

.

$$f(k+1) > g(k) \Leftrightarrow \frac{(k+2)}{n-k-1}\sigma_1 > \frac{(k+1)}{n-k}\sigma_2$$

.

Soit  $z(k) = \frac{(k+1)}{n-k}\sigma_2 \times \frac{n-k-1}{k+2}$  alors  $\forall \sigma_2 > 0, \sigma_1 \in ]M, \sigma_2[, f(k+1) > g(k)$ .

$M$  est le maximum de la fonction  $z(k)$  avec  $k \in [1, n-1]$ .

En résumé, la proposition 3 est vraie  $\forall \sigma_2 > 0$  et  $\sigma_1 \in ]M, \sigma_2[$ .

Nous avons montré que pour toute proposition  $p_\alpha$  qui a  $k$  acceptations,  $f(k) \leq w_s(p_\alpha) \leq g(k)$ . S'il existe à l'instant  $t+1$  une proposition  $p_\beta$  qui a  $k+1$  acceptations alors quelles que soient les valeurs de satisfaction des agents pour  $p_\alpha$ ,  $w_s(p_\beta) > w_s(p_\alpha)$ , nous avons :  $f(k) \leq w_s(p_\alpha) \leq g(k) < f(k+1) \leq w_s(p_\beta) \leq g(k+1)$ .

La figure 3.4 représente graphiquement le domaine (zone coloriée en rouge) des valeurs de satisfaction sociale des propositions pour  $n = 50$  agents,  $\sigma_2 = 3$  et  $\sigma_1 = 2.78$ .

La fonction de satisfaction sociale  $w_s$  permet d'établir une relation de préférence complète, réflexive et transitive sur l'ensemble des propositions soumises. Elle permet de classer toutes les propositions dont les taux d'acceptation sont supérieurs ou égaux à  $\phi_{maj}$ . La proposition qui a la plus grande valeur de satisfaction sociale devient la solution. Nous avons montré que lorsque cette proposition existe, elle détient aussi le plus grand taux d'acceptation. Notons que pour obtenir ce résultat, les valeurs de  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  doivent respecter une certaine contrainte telle que :  $\sigma_1 \in ]M, \sigma_2[$ .

**EXEMPLE 8** *Nous considérons ici les données de l'exemple 7 avec des valeurs  $\sigma_1 = 2.78$  et  $\sigma_2 = 3$ .*

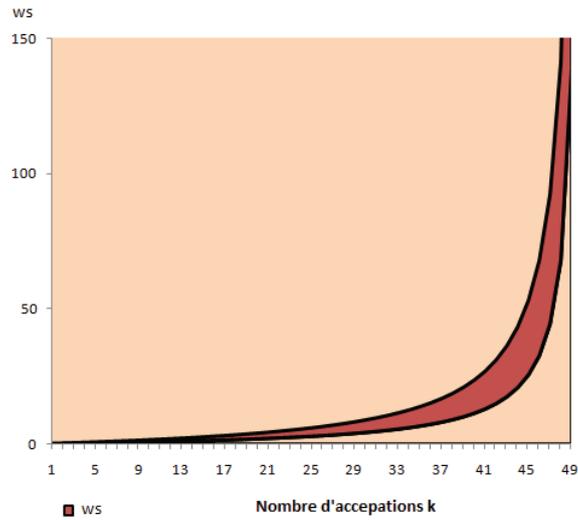


FIGURE 3.4: Espace des valeurs de satisfaction sociale des propositions.

Au point de contrôle								
Agent	Proposition	$n_{ac}$	$n_{re}$	$n_{at}$	$n_{rf}$	$\mathcal{T}^{ac}$	$\sigma_p$	$w_s$
$a_1$	$p_1^1$	3	0	0	2	60%	(2.78,2.78,2.78,0,0)	2.78
$a_2$	$p_2^1$	2	2	1	3	40%	(3,3,0,0,0)	1.5
$a_3$	$p_3^3$	3	1	0	2	60%	(2.78,2.78,3,0,0)	2.85
$a_4$	$p_4^4$	2	0	0	3	20%	(2.78,0,0,2.78,0)	1.39
$a_5$	$p_5^5$	2	1	0	3	40%	(3,0,0,0,2.78)	1.44

TABLE 3.2: Solution avec la fonction  $w_s$ .

Dans la table 3.2, nous avons une seule alternative de solution (cellules coloriées en bleu). Cette solution satisfait à la fois la règle de la majorité et la règle du vote par valeurs. La fonction d'agrégation proposée ici permet le choix d'une solution juste et équitable.

Nous avons aussi identifier les conditions dans lesquelles un système de vote mixte combinant le vote par approbation et le vote par valeurs peut garantir un choix collectif respectant à la fois la règle de la majorité et la somme des valeurs de score.

Dans un scénario de négociation, il peut arriver que plusieurs propositions acceptables obtiennent la même valeur de satisfaction. Dans ce cas, pour choisir une solution unique, nous comparons ces propositions selon leurs valeurs de support. S'il existe encore des ex aequo, ces dernières seront comparées selon leurs estampilles. Il existe toujours entre deux propositions un laps de temps  $\epsilon$  qui sépare leurs dates d'obtention de la majorité.

## Valeur de support d'une proposition

Chaque proposition  $p_\alpha$  admet une valeur  $v_{p_\alpha} = \frac{n_{ac_\alpha} + n_{re_\alpha}}{n_{rf_\alpha} + n_{at_\alpha} + 1}$  représentant le rapport entre la somme du nombre d'acceptations et de renforcements et la somme du nombre de refus et d'attaques.  $n_{ac_\alpha}, n_{re_\alpha}, n_{rf_\alpha}, n_{at_\alpha}$  sont, respectivement, le nombre d'agents qui ont accepté, renforcé, refusé, attaqué la proposition  $p_\alpha$ .  $v_{p_\alpha}$  varie au cours de la négociation. Elle augmente lorsque les nombres d'acceptations et de renforcements augmentent. Elle diminue lorsque les nombres de refus ou d'attaques augmentent. La valeur d'une proposition est utilisée pour comparer les indifférences sociales selon la fonction  $w_s$ .

## VI. Protocole de négociation distribuée

Nous proposons ici un mécanisme de négociation dans lequel l'interaction des agents est entièrement décentralisée. Chaque agent cherche à défendre ses propres intérêts. Le principal défi d'une telle négociation est de savoir comment un agent peut trouver celui avec lequel il peut obtenir le meilleur compromis ?

Pour aborder ces difficultés, nous proposons un mécanisme de négociation distribuée dans lequel les agents sont partitionnés en plusieurs groupes nommés anneaux dans lesquels ils négocient (voir Figure 3.5). Nous cherchons à travers ce mécanisme à limiter la portée de l'interaction et donc à réduire la charge cognitive des agents pour traiter les propositions qu'ils reçoivent, et pour prendre des décisions. Nous définissons des règles de protocole pour faciliter la convergence des négociations et des politiques d'interaction inter-anneaux donnant plus de flexibilité à la négociation.

La négociation s'effectue dans chaque anneau où les agents membres tentent de construire des solutions qu'ils vont ensuite défendre auprès des agents des autres anneaux.

### 1 Répartition des agents en anneaux

Le but de la répartition des agents en groupes est de leur permettre de mener des discussions facilitant l'établissement d'accords. Dans un contexte de négociation réelle, les participants peuvent avoir des niveaux d'importance différents dans la prise de décision. Par exemple, dans le scénario de négociation considéré (voir figure 3.1), les maires, les représentants des compagnies, le préfet ont tous des niveaux de compétence différents dans le projet de mise en place de la nouvelle ligne de tramway. Les compétences des agents dans une négociation peuvent être prises en compte dans divers contextes conduisant à différentes formes de négociation. Dans notre mécanisme de négociation, le poids d'un agent représente son niveau de compétence et ainsi son importance dans la prise de décision.

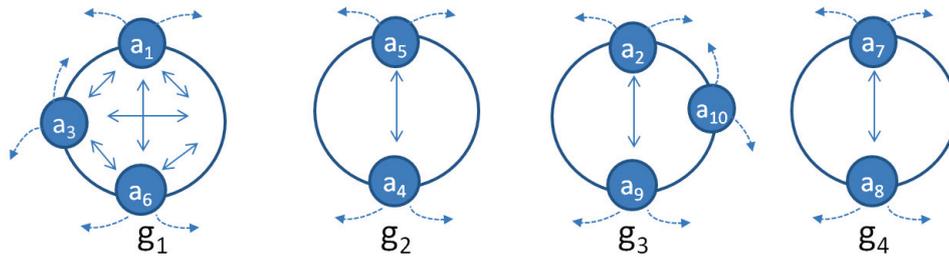


FIGURE 3.5: Structure de négociation distribuée.

Sur cette figure, les nœuds représentent les agents et les cercles représentent les anneaux. Les flèches à l'intérieur des cercles représentent les échanges entre les agents d'un anneau, et les flèches partant des nœuds montrent que les agents peuvent écouter les échanges qui s'effectuent en dehors de leur anneau et qu'ils peuvent aussi donner leurs opinions sur les propositions écoutées.

Sur cet exemple, 10 agents sont répartis en quatre anneaux  $g_1, g_2, g_3$  et  $g_4$

Intuitivement, nous supposons que les agents ayant des poids similaires peuvent avoir des buts plus proches. Ainsi, nous proposons une stratégie de répartition des agents en s'appuyant sur leur poids. L'objectif est de regrouper, dans chaque anneau, des agents ayant des poids similaires. Cela peut avoir un impact dans la recherche d'accord.

La répartition de l'ensemble des agents  $\mathcal{A} = \{a_1, \dots, a_n\}$  en plusieurs groupes (anneaux)  $\mathcal{G} = \{g_1, \dots, g_m\}$  se base sur le poids des agents et s'effectue en deux étapes : (1) le choix du nombre d'anneaux ; (2) l'affectation des agents dans les anneaux. Chaque agent doit appartenir à un et un seul groupe, chaque groupe doit avoir au moins deux agents. Ainsi, pour un nombre  $n$  d'agents, on peut former au plus  $m = \lfloor n/2 \rfloor$  anneaux ou groupes.

Le nombre d'anneaux à former est calculé en fonction de la disparité des poids des agents. Il existe plusieurs façons de calculer l'indice de dispersion des agents en fonction de leur poids : l'écart-type, la variance, etc. Ici, l'indice de dispersion noté  $\mathcal{D}p$  est la différence entre le poids le plus grand et le poids le plus petit.

- Si  $0 < \mathcal{D}p < 1$ , le nombre d'anneaux  $m$  est calculé comme suit :

$$m = \lceil \mathcal{D}p \times n/2 \rceil \quad (3.4)$$

L'affectation des agents dans les anneaux se fait de manière stratégique.

- Si  $\mathcal{D}p = 0$ , cela signifie que tous les agents ont le même poids et le nombre d'anneaux est choisi aléatoirement. Les agents sont ensuite affectés aléatoirement dans les anneaux.

Dans tous les cas, l'affectation des agents dans les anneaux s'effectue en respectant la règle suivante :

$$\bigcap_{k \geq 1}^m \mathcal{A}g_k = \emptyset, \bigcup_{k \geq 1}^m \mathcal{A}g_k = \mathcal{A}, |\mathcal{A}g_k| \geq 2 \quad (3.5)$$

## 2 Négociation au sein d'un groupe

À chaque tour, la négociation s'effectue simultanément dans chaque anneau. Chaque agent soumet ses propositions aux membres de son anneau. Chaque agent  $a_i$  évalue avec sa fonction d'utilité  $u_{ai}$  chaque proposition qu'il reçoit. Il peut ensuite soit l'accepter, la refuser, la renforcer ou l'attaquer. Les agents interagissent selon les règles du protocole définies comme suit :

**R<sub>i1</sub>** : chaque agent peut soumettre un nombre limité de propositions  $\delta_p$  et peut faire un nombre limité de refus  $\delta_r$  au cours de la négociation.

**R<sub>i2</sub>** : chaque agent soumet ses propositions qu'aux membres de son anneau à tout moment de la négociation.

**R<sub>i3</sub>** : chaque agent peut accepter une proposition faite par un autre agent à n'importe quel moment de la négociation.

**R<sub>i4</sub>** : une proposition ne peut être acceptée, refusée, attaquée ou renforcée plusieurs fois par le même agent.

Ces règles permettent aux agents de mieux canaliser leurs interactions et de négocier de façon plus concise. Elles permettent aussi de limiter les taux de messages et de traitement. Le fait de limiter le nombre de refus facilite la recherche d'accords en évitant certaines stratégies des agents. Les agents peuvent aussi faire des concessions en acceptant, par exemple, une proposition qu'ils auraient refusée auparavant.

Pour rendre le mécanisme de négociation flexible, chaque agent qui le souhaite peut prendre connaissance des échanges qui s'effectuent à l'extérieur de son anneau via l'écoute flottante.

## 3 Les politiques d'interaction inter-groupes (inter-anneaux)

Une politique d'interaction inter-anneaux doit déterminer : à quel moment de la négociation les agents peuvent prendre connaissance des échanges effectués en

dehors de leur anneau ; quand est-ce-que les agents peuvent donner leurs opinions concernant les propositions qu'ils ont écoutées ; comment un agent va-t-il défendre ses propositions dans les autres anneaux. Il existe plusieurs façons de définir une politique d'interaction inter-anneaux. Nous proposons une politique qui permet la communication libre et réglementée entre les anneaux appelée Free Inter-rings Communication (FIC).

FIC autorise dans un premier temps à chaque agent qui le souhaite d'écouter, à tout moment de la négociation, les propositions soumises en dehors de son anneau. Il peut réagir sur ces propositions soit en les renforçant, soit en les attaquant tout en restant dans son anneau. Cependant, un agent ne peut soumettre ses propositions que dans son propre anneau. Dans un deuxième temps, l'agent peut se déplacer dans un autre anneau pour soumettre à nouveau ses propositions afin qu'elles puissent atteindre la majorité. Lorsqu'il rejoint un anneau il est autorisé à accepter, refuser, attaquer ou renforcer toutes propositions soumises dans cet anneau. Les migrations des agents entre les anneaux sont régies par des règles de mobilité limitant le nombre de déplacements et le nombre de fois qu'un agent peut visiter un anneau.

$R_{m1}$  : un agent  $a_i$  ne peut visiter plus de  $\delta_v$  fois le même anneau pendant toute la négociation.

$R_{m2}$  : un agent  $a_i$  ne peut effectuer plus de  $\delta_d$  déplacements pendant toute la négociation.

Chaque agent qui décide de migrer vers un autre anneau, met en œuvre ses propres stratégies pour identifier l'anneau dans lequel ses intérêts seront mieux défendus. Il peut se déplacer soit pour soumettre à nouveau ses propositions qu'il a déjà soumise si celles-ci ont atteint un certain taux d'acceptation dans son précédent anneau, soit pour soumettre de nouvelles propositions. La politique d'interaction FIC autorise les agents à choisir librement (selon leurs stratégies) les moments où ils décident de rejoindre un autre anneau durant un tour de négociation. Une autre variante de FIC appelée Restrictive Inter-rings Communication (RIC) consiste à restreindre les déplacements durant la phase de négociation. Les déplacements ne sont autorisés que pendant les points de contrôle et lorsqu'aucune solution n'ait été trouvée. La politique d'interaction RIC est utilisée dans la troisième contribution de cette thèse (chapitre 5) .

La politique d'interaction FIC rend plus flexible la communication entre les agents.

Elle permet aux agents de négocier progressivement en se déplaçant entre les anneaux. Nous précisons que l'interaction des agents appartenant à des anneaux différents est limitée par les intérêts des agents. Nous supposons que les surcoûts de communication qu'induit cette politique d'interaction sont négligeables par rapport à la complexité du raisonnement des agents et au coût de calcul lorsque tous les agents sont réunis dans un seul groupe.

Dans la section suivante, nous présentons les stratégies de migration des agents entre les anneaux pour défendre leurs propositions.

#### 4 Stratégies de migration des agents

Compte tenu des règles de mobilité présentées ci-dessus, un agent a besoin de mettre en place des stratégies lui permettant de déterminer dans un premier temps le moment pour changer d'anneau et lequel il doit rejoindre. Cela consiste à mesurer d'abord l'état d'avancement des échanges qui s'effectuent dans chaque anneau écouté et ensuite à utiliser ces informations pour prendre des décisions. Lorsque les échanges dans un anneau aboutissent à des désaccords, cela peut donner la possibilité à un nouvel agent qui va rejoindre celui-ci de soumettre ses propositions qui peuvent satisfaire les objectifs des agents de cet anneau.

Nous considérons ici, qu'un anneau est faible à l'instant  $\delta_t$  de la négociation lorsque toutes les propositions soumises dans cet anneau ont des taux d'acceptation qui sont inférieurs à un certain seuil  $\varphi_{weak} = \alpha^P(\delta_t)$  (cf. section 1). Notons qu'un agent peut écouter plusieurs anneaux en même temps mais il ne peut pas rejoindre plusieurs anneaux en même temps. Ainsi, s'il existe au moins deux anneaux écoutés qui sont faibles, l'agent devra choisir un seul anneau à rejoindre. Ce choix est fait selon un ensemble de critères défini ci-dessous :

- (1) le nombre d'agents dans l'anneau car l'agent vise à convaincre autant d'agents que possible
- (2) le poids de l'anneau, ce critère est important lorsqu'on donne des importances différentes aux décisions des agents en fonction de leur poids. Par exemple, le taux d'acceptation d'une proposition peut être évalué selon le poids des agents. Ainsi, l'agent cherchant à faire accepter ses propositions par les autres va viser les agents dont les poids sont plus élevés.
- (3) l'écart entre les taux d'acceptation des propositions soumises dans l'anneau et ceux de l'agent qui met en œuvre la stratégie.

Ces critères permettent à l'agent d'évaluer son degré d'influence dans l'anneau qu'il souhaite rejoindre et ainsi les chances que ses propositions soient acceptées.

Nous formalisons ces critères comme suit :

Soit  $\mathcal{G}_{a_i}^O \subset \mathcal{G}$  l'ensemble des anneaux écoutés par l'agent  $a_i \in g_k$ . Chaque anneau  $g_y \in \mathcal{G}_{a_i}^O$  est représenté par un vecteur d'utilité  $u(g_y) = (u_1(g_y), u_2(g_y), u_3(g_y))$  dont les éléments représentent respectivement, l'évaluation de la distance entre l'anneau  $g_y$  et  $g_k$  suivant les critères : leur nombre d'agents, leur poids et l'écart entre leurs propositions. Les éléments du vecteur  $u_1(g_y), u_2(g_y), u_3(g_y)$  sont calculés comme suit :

$u_1(g_y) = \frac{|A_{g_y}|}{|A_{g_k}|} > 0$  est le ratio entre le nombre d'agents appartenant à l'anneau  $g_y$  écouté et le nombre d'agents appartenant à l'anneau  $g_k$  de l'agent.

$u_2(g_y) = \frac{w_{g_y}}{w_{g_k}} > 0$  est le ratio entre le poids moyen des agents appartenant à  $g_y$  et celui des agents de  $g_k$ .

$u_3(g_y) = \frac{T_{p_a}^{ac}}{T_{p_c(i)}^{ac}} > 0$  est le ratio entre les taux d'acceptation de la proposition  $p_a$  ayant le plus grand taux d'acceptation dans  $g_y$  et le taux d'acceptation de la proposition courante  $p_c(i)$  de l'agent  $a_i$ .

Le choix de l'anneau à rejoindre est non trivial lorsque l'agent  $a_i$  écoute plusieurs anneaux en même temps. Pour comparer les vecteurs d'utilité des anneaux et déterminer celui que l'agent doit rejoindre pour mieux défendre ses propositions, nous utilisons *la dominance de Lorenz* [36] pour établir un ordre de préférence totale sur l'ensemble  $\mathcal{G}_{a_i}^O$ .

**Définition 6** Pour tout  $x \in \mathbb{R}_+^n$ , le vecteur de Lorenz généralisé associé à  $x$  est le vecteur :

$$L(x) = (x_{(1)}, x_{(1)} + x_{(2)}, \dots, x_{(1)} + x_{(2)} + \dots + x_{(n)})$$

où  $x_{(1)} \geq x_{(2)} \geq \dots \geq x_{(n)}$  représentent les composantes de  $x$  triées en ordre décroissant. La  $k^{\text{me}}$  composante de  $L(x)$  est :

$$L_k(x) = \sum_{i=1}^k x_{(i)}.$$

**Définition 7** La relation de la dominance de Lorenz généralisée sur  $\mathbb{R}_+^n$  est définie par :

$$\forall x, y \in \mathbb{R}^z, x \succeq_L y \Leftrightarrow L(x) \succeq_P L(y).$$

Ici, le symbole  $\succeq$  signifie "dominance".

Nous utilisons la dominance de Lorenz pour éviter les situations où les propositions sont incomparables comme cela peut être le cas avec la dominance de Pareto.

**EXEMPLE 9** Supposons que nous ayons 12 agents repartis en 4 anneaux  $g_1, g_2, g_3, g_4$  (cf. Figure 3.6).  $a_1$  appartient à l'anneau  $g_1$  et soumet sa proposition aux membres du même anneau. À un certain moment de la négociation, l'agent  $a_1$  décide de défendre sa proposition dans les autres anneaux pour obtenir la majorité d'acceptations. Il prend connaissance des échanges qui se sont effectuées dans  $g_2$  et  $g_3$ . Les vecteurs d'utilité de ces derniers sont :  $u(g_2) = (1.5, 0.7, 1.4)$  et  $u(g_3) = (2, 0.5, 1.5)$ .

En supposant que l'agent accorde les mêmes importances à tous les critères, avec la dominance de Pareto, aucun vecteur ne domine l'autre. Il sera impossible pour  $a_1$  de déterminer l'anneau qu'il va rejoindre.

Les vecteurs de Lorenz généralisés associés à  $u(g_2)$  et  $u(g_3)$  sont, respectivement,  $L(u(g_2)) = (1.4, 2.9, 3.6)$ ,  $L(u(g_3)) = (2, 3.5, 4)$ .

Nous obtenons ainsi la relation de dominance suivante :

$$L(u(g_3)) \succeq_P L(u(g_2)) \Leftrightarrow u(g_3) \succeq_L u(g_2).$$

Par conséquent, l'agent  $a_1$  va rejoindre  $g_3$ .

## 5 Les points de contrôle

La négociation se déroule en plusieurs tours séparés par des points de contrôle périodiquement effectués pendant la négociation. Ils permettent de vérifier le déroulement de la négociation en analysant les résultats des échanges effectués dans tous les groupes. Cela consiste à vérifier s'il existe une proposition acceptée par la majorité des agents. Les points de contrôle permettent éventuellement de conclure si la négociation est arrivée à une solution, ou si elle a échoué. Deux résultats sont possibles à la fin d'un point de contrôle : soit il existe une solution, auquel cas la négociation aboutit au succès, soit il n'y en a pas, auquel cas elle

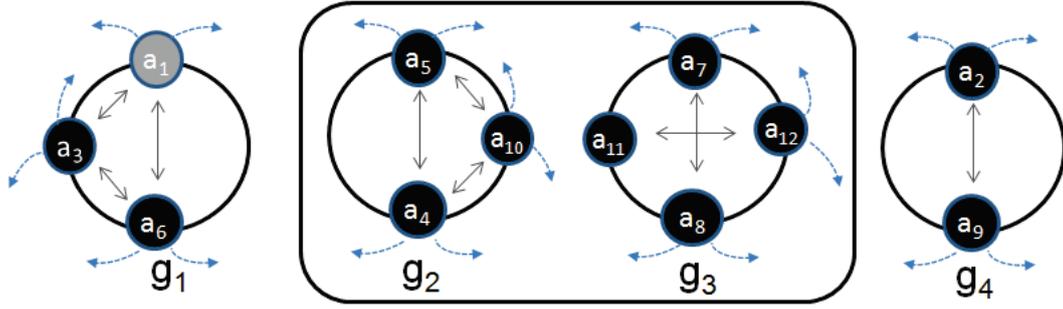


FIGURE 3.6: La phase de négociation de l'exemple 9. Sur cette figure, les nœuds représentent des agents et les cercles représentent les anneaux. Le nœud colorié en gris représente l'agent qui est entrain d'écouter les échanges en dehors de son anneau. Le rectangle entourant les anneaux montrent que l'agent  $a_1$  écoute les anneaux  $g_2$  et  $g_3$ . Il souhaite rejoindre l'un de ces anneaux.

est poursuivie si la date limite n'est pas atteinte. Si, au dernier point de contrôle, aucune solution n'est trouvée, la négociation se termine par un échec.

Le nombre de points de contrôle  $q$  prévu et leurs dates sont prédéfinis. Cette information est publique et connue par tous les agents. Nous définissons formellement le processus d'un point de contrôle comme suit :

Soit  $C_{pt} = \{C_{pt_1}, \dots, C_{pt_q}\}$  l'ensemble des points de contrôle prévus. Chaque point de contrôle  $C_{pt_r}$  est représenté par un tuple d'éléments  $(t_r, S_r)$ , dont les éléments sont respectivement, la date, l'ensemble des propositions acceptables, c'est-à-dire celles qui ont atteint le seuil de la majorité  $\phi_{maj}$ .

$C_{pt} = \{C_{pt_1} = (t_1, S_1), \dots, C_{pt_q} = (t_q, S_q)\}$  est un ordre chronologique ( $t_1 < \dots, t_q < d_l$ ).

Lorsqu'un point de contrôle  $C_{pt_r}$  s'effectue, tout agent  $a_i \in \mathcal{A}$  communique et ajoute ses propositions qui ont atteint le seuil de la majorité dans  $S_r$ .

Si  $|S_r| = \emptyset$  alors il n'y a aucune solution trouvée. Si  $r \neq q$  alors la négociation continue au tour suivant et le résultat sera évalué de nouveau au tour  $C_{pt_{r+1}}$ . Si  $r = q$  alors la négociation se termine en ÉCHEC.

Si  $|S_r| = 1$  alors il existe une seule proposition majoritaire qui sera retenue comme la solution finale de la négociation. La négociation se termine alors en SUCCÈS.

Si  $|S_r| > 1$  alors il existe plusieurs propositions acceptables comme solution. Pour sélectionner une et une seule proposition qui est à la fois majoritaire et juste, le processus de décision social présenté dans section 3 est mis en œuvre.

## VII. Discussions

Dans cette section, nous analysons le mécanisme de négociation proposé ainsi que ses différentes propriétés.

*1 Dans notre mécanisme de négociation, les agents peuvent accepter plusieurs propositions. Cela a pour objectif de faciliter la négociation.*

Chaque agent génère ses propositions et définit ses aspirations en fonction de ses propres connaissances qui sont éventuellement limitées (incomplètes). Ainsi, les propositions qu'il soumet ne sont pas toujours les plus intéressantes pour lui. Au cours de la négociation, il peut recevoir d'autres propositions qui sont au-delà de ses aspirations. Cependant, il est important, d'une part, que l'agent prenne conscience que ses connaissances sont limitées et qu'il peut bien recevoir de meilleures propositions, et d'autre part, que ses aspirations peuvent être très hautes. Le mécanisme proposé permet à chaque agent d'accepter plusieurs propositions au cours de la négociation. Lorsqu'un agent reçoit une proposition qui est au delà de ses aspirations il l'accepte. L'agent est aussi amené à lâcher prise en acceptant des propositions en deçà de ses aspirations lorsqu'au bout d'un certain temps de négociation ses objectifs ne sont pas atteints.

*2 L'acceptation d'une proposition est une décision irréversible.*

Le fait que l'acceptation d'une proposition soit irréversible va empêcher les agents d'avoir un comportement abusif en refusant des propositions qu'ils ont déjà acceptées à chaque fois qu'ils trouvent de meilleures propositions. Pour les mêmes raisons, un agent ne peut pas retirer les propositions qu'il a déjà soumises car la soumission d'une proposition est une acceptation implicite de celle-ci. En effet, le taux d'acceptation des propositions est un facteur déterminant pour le choix de la solution de la négociation. Ainsi, permettre à un agent de retirer ses propres propositions ou de refuser celles qu'il a déjà acceptées ne facilite pas la convergence de la négociation.

Une variante de notre protocole de négociation pourrait permettre aux agents de refuser ou de retirer des propositions qu'ils ont déjà acceptées ou soumises tant

que celles-ci n'obtiennent pas des taux d'acceptations égaux au seuil de majorité fixé. Par exemple, dans [24], les agents peuvent rejeter des propositions qu'ils ont déjà acceptées tant que celles-ci n'ont pas été acceptées par tous les agents. Dans notre mécanisme, nous considérons qu'une acceptation est irréversible

.

### 3 *La réglementation des déplacements des agents entre les anneaux permet d'éviter des situations de blocage de la négociation.*

Nous entendons par blocage de la négociation le fait que des agents ayant déjà négocié dans un anneau se retrouvent à nouveau dans un autre anneau après leurs déplacements. Nous rappelons qu'ici, chaque agent défend ses propositions auprès des autres anneaux. Ainsi, il décide lui-même les autres anneaux qu'il va rejoindre. Cependant, il peut arriver que des agents ayant déjà négocié se retrouvent dans un autre anneau pour échanger à nouveau leurs propositions. Pour éviter des situations pareilles, nous avons limité le nombre de déplacements qu'un agent peut effectuer ainsi que le nombre de fois qu'il peut visiter un anneau. Ces règles permettent aux agents de mener des discussions plus concises.

Dans des travaux ultérieurs, il sera intéressant de trouver d'autres stratégies de déplacement qui permettront aux agents de mieux canaliser leurs interactions. Par exemple, une variante du mécanisme de négociation peut permettre aux agents qui ont accepté la même proposition de se coordonner pour ensuite déléguer un agent qui va défendre leur proposition auprès des autres anneaux.

### 4 *La politique d'interaction FIC que nous avons proposée a pour objectif de rendre flexible la négociation et ainsi de faciliter la recherche d'accords.*

La politique d'interaction FIC proposée autorise les agents à écouter les échanges qui s'effectuent en dehors de son anneau. Cependant, un agent ne peut soumettre ses propositions dans un nouvel anneau que lorsqu'il rejoint cet anneau. Les déplacements d'un agent vers d'autres anneaux peuvent s'effectuer à tout moment de la négociation. Cela a pour avantage de limiter le temps de la négociation mais son inconvénient est qu'il peut induire plusieurs déplacements ainsi que des situations de blocage si le nombre de déplacements n'est pas limité.

Une variante de notre mécanisme pourrait restreindre les déplacements des agents durant la phase de négociation mais les autoriser que durant les points de contrôle.

Cela évitera les situations de blocage mais nécessitera d'autres règles d'interaction et des stratégies de déplacement.

5 *Les tactiques de mise à jour des aspirations et les stratégies de concession que nous avons proposées permettent de faciliter la recherche d'accords.*

Les agents négocient en fonction de leurs aspirations. Chaque agent définit sa zone d'accords possibles, c'est-à-dire son intervalle d'utilités acceptables. Nous avons proposé des stratégies permettant à chaque agent de réviser ses aspirations à la baisse à chaque tour de la négociation et lorsque ses objectifs ne sont pas atteints. Le but de ces stratégies de concessions est de faciliter la prise de décision collective. Ainsi, les agents sont amenés à adopter le lâcher prise en révisant leurs objectifs de départ à la baisse et à accepter ainsi des propositions qu'ils auraient refusées.

Cependant, il est important d'analyser les critères sur lesquels un agent va s'appuyer pour décider de faire des concessions. Ainsi, nous avons introduit un nouveau concept que nous avons appelé estimation de l'évolution du taux d'acceptation des propositions. Nous avons supposé qu'un agent peut faire une estimation de l'avancement de la négociation en se basant sur les connaissances qu'il dispose. Dans le mécanisme proposé, chaque agent a connaissance de la durée maximale de la négociation et du seuil de la majorité fixé. En effet, chaque agent connaît que pour qu'une proposition soit socialement acceptable, elle doit atteindre un taux d'acceptation au moins égal au seuil de majorité fixé lorsque le temps imparti à la négociation sera atteint.

La question est alors comment un agent va estimer l'évolution du taux d'acceptation d'une proposition au cours de la négociation pour prétendre que celle-ci a les chances de devenir la solution de la négociation ? Pour apporter une réponse à cette question, nous avons considéré ici un exemple de fonction d'estimation linéaire de coefficient  $\frac{\phi_{maj}}{d_t}$ . Cela veut dire que le taux d'acceptation estimé est proportionnelle au temps. Cette fonction d'estimation permet à chaque agent d'estimer que la proposition qu'il a soumise ou acceptée aura la chance de devenir ou non la solution de la négociation. L'agent comparera à chaque instant  $t$  le taux d'acceptation qu'a obtenu sa proposition courante avec la valeur de la fonction d'estimation à cet instant  $t$  (le taux d'acceptation estimé) pour ainsi décider de concéder ou pas.

La fonction d'estimation que nous avons utilisée dans ce mécanisme est une solution parmi tant d'autres. Dans des travaux ultérieurs, il sera intéressant d'analyser en détails tous les facteurs qui peuvent être pris en compte dans les stratégies de concession des agents.

#### *6 Les stratégies de répartition des agents en anneaux.*

La répartition des agents en anneaux est la première phase de notre mécanisme de négociation. Le nombre d'anneaux et l'affectation des agents dans ces anneaux sont des facteurs qui peuvent impacter les résultats de la négociation. Ainsi, il est important de trouver des stratégies pour créer les anneaux et d'analyser leur impact dans la négociation. Dans nos évaluations empiriques, nous avons testé le mécanisme de négociation proposé en faisant varier le nombre d'anneaux que les agents peuvent former et nous avons analysé les résultats obtenus. Par exemple, pour tester notre mécanisme de négociation avec 20 agents, nous avons réalisé des simulations avec 1, 2, 5 et 10 anneaux. Les résultats sont détaillés dans le chapitre 6.

Nous avons préconisé une méthode de calcul du nombre d'anneaux à former en fonction des poids des agents. Cependant, nous n'avons pas pris en compte le poids des agents dans leurs interactions. Il sera intéressant dans de futures travaux de recherche d'intégrer le poids de l'agent dans l'évaluation de ses décisions. Par exemple, le taux d'acceptation d'une proposition pourrait être évalué en fonction des poids des agents qui ont accepté cette proposition. Cependant de nouvelles règles de déplacement des agents dans les anneaux pourront être proposées.

## **VIII. Conclusion**

Ce chapitre a présenté un mécanisme de négociation multilatérale dans lequel les agents négocient de manière progressive et sans médiateur. Nous avons considéré un cadre dans lequel les agents ont des intérêts divergents et chacun cherche à convaincre les autres pour qu'ils acceptent ses propositions. Nous avons montré que la difficulté de la recherche d'accords collectifs dans ce contexte peut résider dans la complexité du raisonnement des agents et dans la structuration de leurs interactions. Pour aborder ces problèmes, nous avons préconisé un mécanisme de négociation multilatérale distribuée qui consiste à répartir les agents en plusieurs groupes appelés anneaux. La négociation s'effectue simultanément dans chaque groupe. Chaque agent soumet ses propositions aux membres de son groupe. Il peut se déplacer plus tard vers les autres anneaux pour convaincre le maximum d'agents à accepter ses propositions.

Une autre question de recherche abordée dans ce chapitre est : comment évaluer le résultat de la négociation pour garantir le choix d'une solution équitable et juste. Dans ce sens, nous avons proposé une nouvelle méthode d'évaluation de la satisfaction sociale des agents concernant une proposition. Nous avons ainsi répondu aux problèmes que posent la comparaison des utilités des agents ainsi que les autres fonctions de bien-être social existantes. La fonction de satisfaction sociale proposée s'appuie sur le principe de John Rawls afin de garantir un choix de solution juste et équitable comparée à celle qu'on aurait obtenue si la règle de la majorité était uniquement utilisée ou l'optimum de Pareto. Nous avons aussi introduit d'autres critères tels que la valeur de support et l'estampille d'une proposition. Ces critères sont utilisés de façon hiérarchique afin de garantir un choix de solution unique.

L'objectif du mécanisme de négociation est de faciliter la recherche d'accords. Ainsi, nous avons proposé des politiques d'interaction et des stratégies de négociation qui permettent aux agents de négocier plus efficacement. Nous nous sommes appuyés sur des hypothèses qui peuvent s'appliquer dans plusieurs contextes applicatifs. L'évaluation empirique de notre mécanisme de négociation est présentée dans le chapitre 6.

Le modèle de négociation proposé s'adresse particulièrement aux négociations dans lesquels les agents négocient sur un seul attribut. Chaque proposition soumise par un agent est une suggestion de solution au problème sur lequel se porte la négociation. Ici, chaque agent est considéré comme une partie négociatrice. Il cherche individuellement à défendre ses propositions.

Dans le prochain chapitre nous aborderons les modèles de négociation par équipes et qui impliquent plusieurs attributs. Ainsi, nous présenterons d'autres méthodes de répartition des agents en groupes ainsi que des politiques d'interaction facilitant la recherche d'accords collectifs.



# Chapitre 4

## DÉCISION COLLECTIVE SUR PLUSIEURS ATTRIBUTS

*Ce chapitre aborde la négociation multilatérale dans un contexte plus complexe. Dans ce cadre, les agents négocient sur plusieurs attributs. Nous considérons que les intérêts d'un agent peuvent se limiter à une partie des attributs négociés. Donc, ses propositions ne portent que sur les attributs qui l'intéressent et peuvent constituer une partie de la solution finale de négociation. Nous proposons un nouveau mécanisme de négociation permettant de structurer et de canaliser les interactions des agents. Dans ce mécanisme, les agents forment des alliances pour défendre ensemble leurs propositions.*

## I. Introduction

La négociation multi-attributs est fondamentale dans les systèmes multi-agents. Elle s'applique dans plusieurs contextes tels que l'allocation des ressources, la planification des tâches ou la résolution de problèmes. Plusieurs scénarios de négociation réelle portent sur plusieurs attributs augmentant ainsi la complexité de la recherche d'accords collectifs. A titre d'exemple, considérons un ensemble de foyers qui décident de souscrire un contrat groupé d'énergie dans le but de réduire leurs factures énergétiques. Ces foyers n'ayant pas les mêmes profils de consommation doivent négocier sur plusieurs aspects du contrat : le fournisseur, les horaires de fourniture, le type d'énergie, etc. pour parvenir à un choix collectif.

Le problème des négociations multi-attributs est l'étendue de l'espace des solutions et l'évaluation complexe des offres portant sur plusieurs attributs qui sont souvent interdépendants.

Dans la littérature, la plupart des travaux sur les négociations qui impliquent plusieurs attributs proposent des protocoles de négociation bilatérale et désignent en grande partie des médiateurs pour faciliter la négociation. Dans [84], les auteurs présentent une stratégie d'agent dans un contexte de négociation bilatérale impliquant plusieurs attributs interdépendants alors que dans ce travail, nous abordons les négociations impliquant un grand nombre d'agents. Les travaux dans [111] concernent la conception d'un mécanisme de négociation automatique dans le commerce électronique. La négociation implique plusieurs attributs classés en deux catégories (discrète et continue). Le vendeur et le client négocient sur plusieurs combinaisons d'items discrets en ne changeant que le prix. La négociation est bilatérale et il existe un médiateur dont le rôle est d'informer les agents sur les potentiels prix qui peuvent aboutir à un accord. Par contre dans notre protocole, les agents dirigent eux-mêmes leurs interactions, il n'existe aucun agent médiateur. Dans [47], les auteurs s'intéressent au problème d'agrégation des utilités des items interdépendants.

En résumé, les protocoles de négociation multilatérale multi-attributs ont reçu moins d'attention. Cela est dû à leur complexité et à la difficulté de prendre en compte tous les aspects inhérents à ce type de négociation. [45] aborde la négociation multilatérale multi-attributs dans laquelle il définit un agent médiateur qui recommande aux agents des propositions pour faciliter la négociation et appréhender la complexité de la prise en compte de l'interdépendance des différents items.

La plupart des travaux concernant les modèles de négociation multi-attributs proposent des approches centralisées, c'est-à-dire, soit ils définissent un médiateur, soit la communication entre les agents se fait par diffusion *broadcast*. Certains travaux proposent une décomposition de l'ensemble des attributs sur lequel porte la négociation dans le but de faciliter la recherche d'accords. [113] propose un modèle de négociation hiérarchique dans lequel des groupes d'attributs sont négociés suivant un ordre établi dans un agenda par un agent médiateur. À chaque niveau de la hiérarchie, tous les agents font des offres portant sur le sous-ensemble d'attributs à négocier. L'objectif de ce modèle est de limiter les calculs effectués par les agents et de faciliter la négociation. Dans [34], les auteurs proposent une décomposition des attributs en sous-ensembles d'attributs indépendants. Pour chaque sous-ensemble d'attributs, le médiateur propose des contrats et les agents procèdent au vote. Dans ce protocole, les agents ne communiquent pas entre eux à la différence du protocole de négociation que nous proposons.

Enfin, ces travaux ne se focalisent pas sur la structure organisationnelle des agents qui peut aussi affecter la complexité, la réactivité et imposer des coûts de communication [46].

La contribution de ce chapitre est de proposer un modèle de négociation multilatérale multi-attributs en se basant sur une structure d'organisation et d'interaction décentralisée permettant aux agents de négocier de façon incrémentale. Nous considérons ici que les agents n'ont pas tous les mêmes besoins et peuvent s'intéresser à des sous-ensembles d'attributs qui sont différents. Les agents ne révèlent les valeurs des attributs les concernant que durant leurs échanges, à travers leurs offres. À l'issue de la négociation, chaque attribut doit avoir une valeur représentant le choix collectif des agents concernés. Une telle négociation nécessite des protocoles spécifiques permettant à chaque agent de n'échanger qu'avec ceux avec lesquels il partage des intérêts communs. Notre but est, ainsi de réduire la complexité du raisonnement des agents en limitant leur champ d'interaction.

## II. Approche générale

Le mécanisme de négociation proposé se fonde sur une approche incrémentale et itérative s'inspirant toujours de la méthode "Diviser pour régner" abordée dans le chapitre 3. Dans ce dernier, nous avons présenté un modèle de négociation dans un contexte où chaque agent peut suggérer une proposition qui peut être retenue

à la fin de la négociation comme la solution finale. Dans ce présent chapitre, plusieurs attributs sont négociés et chaque agent peut s'intéresser seulement à une partie des attributs. Dans ce cas, les propositions d'un tel agent ne peuvent être que partielles car elles ne portent que sur une partie des attributs de la solution finale. La solution finale de la négociation est une combinaison d'un ensemble de propositions des agents. Les hypothèses sur lesquelles s'appuie notre mécanisme sont :

- les fonctions d'utilité des agents sont des informations privées.
- les agents sont égoïstes, chacun tente de conduire la négociation vers la solution qui lui est plus favorable.
- l'interaction des agents est totalement décentralisée, il n'existe aucune unité de contrôle.

Ainsi, mettre tous les négociateurs (agents) autour d'une "seule table", comme dans le protocole de multiples offres alternées (Figure 2.2), proposé dans [7], augmenterait encore la complexité du raisonnement des agents, les coûts de communication et de traitement des offres. L'approche préconisée consiste à diviser les agents (non les attributs [34]) en plusieurs groupes selon leur similarité par rapport aux attributs sur lesquels ils décident de négocier. Les agents de chaque groupe négocient sur les attributs qu'ils ont en commun pour construire des solutions partielles qu'ils vont affiner de manière itérative pour trouver une solution finale complète concernant tous les attributs.

### **III. Présentation du modèle**

#### **1 Exemple de scénario**

Dans la suite de ce chapitre, nous utilisons le scénario de négociation pour l'achat groupé d'énergie pour mettre en exergue les aspects de la négociation multilatérale multi-attributs. L'achat groupé d'énergie est devenu aujourd'hui un moyen permettant aux foyers de mieux gérer leurs factures énergétiques [106]. Le groupe Selectra, le leader de la comparaison des offres d'énergie a lancé une nouvelle plateforme web permettant aux foyers de mutualiser leurs achats d'électricité [106]. Chaque participant s'inscrit sur la plateforme en renseignant ses préférences. La Selectra négocie les offres auprès des fournisseurs et propose la meilleure offre à chacun des participants. Chaque participant est libre d'accepter l'offre proposée par la Selectra ou d'y renoncer. Pour permettre à ces foyers

de concrétiser ensemble leur projet d'achat groupé d'énergie il est possible de considérer un nouveau cadre dans lequel les foyers communiquent entre eux pour négocier l'offre à laquelle ils veulent souscrire.

Supposons, à titre d'illustration, qu'un groupe de foyers décide d'acheter ensemble de l'énergie afin de réduire leurs dépenses énergétiques. Pour souscrire un contrat groupé d'énergie, ils doivent ensemble se mettre d'accord sur les différents aspects du contrat : le produit (électricité ou gaz), les fournisseurs d'énergie, la durée du contrat, les tarifs (heures de pointe et heures creuses, prix fixe, prix variable), les services clients, le mode de paiement, les conditions de résiliation, etc. Une négociation dans un tel contexte implique plusieurs points sur lesquels les foyers devront se mettre d'accord. Dans la pratique, ces foyers ont le plus souvent des profils de consommation qui peuvent être différents. Certains peuvent disposer de sources supplémentaires d'énergie (panneaux solaires, éoliennes etc.) qui assurent une partie de leurs besoins énergétiques à des moments spécifiques de la journée, d'autres sont sans sources de production d'énergie, etc. En effet, chacun de ces participants peut s'intéresser uniquement à une partie des attributs du contrat selon son profil de consommation, ses besoins et ses préférences.

## 2 Modèle proposé

Notre mécanisme de négociation consiste à diviser les agents en plusieurs groupes selon leur choix sur les attributs qu'ils souhaitent discuter. Les agents dans chaque groupe négocient pour trouver un accord collectif sur chaque attribut qu'ils ont en commun. Chaque agent formule ses propositions en donnant une valeur à chaque attribut négocié dans son groupe. Une proposition d'un agent est alors un tuple de valeurs représentant ses préférences pour les attributs concernés.

**EXEMPLE 10** *Supposons qu'un ensemble de foyers négocient sur une partie des éléments du contrat énergétique : le fournisseur, la tarification et la durée du contrat. Les attributs sont respectivement Fournisseur, Tarif, Durée contrat. Une proposition  $p$  d'un agent appartenant à ce groupe peut être  $p = (\text{EDF}, \text{tarif variable}, 2 \text{ ans})$ .*

Une proposition est dite *partielle* lorsqu'elle ne concerne qu'un sous-ensemble des attributs en jeu et elle est dite *complète* lorsqu'elle concerne tous les attributs.

Dans ce protocole, une proposition devient une solution collectivement acceptable si elle est complète et acceptée par la majorité des agents.<sup>1</sup>

---

1. Il peut y avoir d'autres façons de décider du résultat final. Notre protocole de négociation peut facilement être adapté à d'autres règles de vote.

Lorsqu'un sous-ensemble d'agents accepte une proposition, les agents forment une alliance, c'est-à-dire qu'ils vont unir leurs forces pour défendre ensemble cette proposition lorsque la négociation est poursuivie. Ici, l'union des forces signifie que les agents d'une alliance définissent ensemble des stratégies de négociation communes pour faire face aux autres alliances [18, 88].

Une alliance dominante est une alliance formée par la majorité des agents (majorité absolue) qui supportent (acceptent) une *proposition complète*.

Durant la négociation, plusieurs alliances peuvent se former au sein de chaque groupe. Chaque alliance supportant une proposition partielle et n'ayant pas la majorité des agents cherche à évoluer en fusionnant avec d'autres alliances afin de devenir l'alliance dominante. Ce processus de fusion s'effectue de façon simple si les alliances n'ont aucun attribut en commun. Autrement dit, leurs propositions se portent sur des sous-ensembles d'attributs disjoints. Dans le cas contraire, la fusion s'effectue par une négociation sur les attributs en conflit, ce que nous appelons ici : *un processus d'affinement*. La *fusion simple* et l'*affinement* des propositions entre les alliances se poursuivent jusqu'à ce qu'au moins une alliance détienne la majorité des agents et supporte une proposition complète, ou jusqu'à ce que le temps imparti à la négociation soit atteint. En résumé, notre mécanisme de négociation comprend les phases suivantes :

**Phase 1 est la phase de répartition des agents en groupes.** Elle s'effectue de manière distribuée et en fonction des similarités des agents sur les attributs qu'ils vont négocier.

**Phase 2 est la phase de négociation.** Elle s'effectue simultanément dans chaque groupe et en plusieurs tours. À chaque tour, les agents dans chaque groupe échangent leurs propositions selon les règles du protocole que nous détaillons plus tard. Pour rendre la négociation plus flexible, nous définissons une politique d'interaction *inter-groupes* permettant aux agents d'écouter les échanges qui s'effectuent dans les autres groupes.

**Phase 3 est le point de contrôle.** Elle consiste à vérifier s'il existe une alliance gagnante. La négociation se termine si cette dernière existe, sinon elle est poursuivie et la phase 2 recommence.

## IV. Formalisation

### 1 Agents et Groupes

Soit  $\mathcal{A} = \{a_1, \dots, a_n\}$  l'ensemble des agents et  $E = (e_1, \dots, e_k)$  l'ensemble des attributs<sup>2</sup> sur lequel porte la négociation avec  $n$  le nombre d'agents et  $k$  le nombre d'attributs. Soit  $E_{a_i}$  le sous-ensemble des attributs sélectionnés par  $a_i$ ,  $\mathcal{G} = \{g_1, \dots, g_m\}$  l'ensemble des groupes d'agents formés initialement. Chaque groupe  $g_x$  est un triplet  $(\mathcal{A}_{g_x}, E_{g_x}, \mathcal{P}_{g_x})$  avec  $\mathcal{A}_{g_x}$  l'ensemble des agents appartenant à  $g_x$ ,  $E_{g_x}$  le sous-ensemble d'attributs sur lequel les agents de  $g_x$  négocient et  $\mathcal{P}_{g_x}$  l'ensemble des propositions soumises dans  $g_x$ .

### 2 Propositions et fonctions d'utilité

Une proposition  $p_\alpha$  est un tuple de valeurs  $v(e_1), \dots, v(e_k)$  dont chacune concerne un attribut (cf. exemple 10).

Soit  $\mathcal{X} = \{x_{(1)}, \dots, x_{(r)}\}$  l'ensemble des critères qu'utilisent les agents pour évaluer les propositions. Chaque agent  $a_i$  sélectionne, en fonction de ses objectifs, un sous-ensemble de critères  $\mathcal{X}_i \subseteq \mathcal{X}$  sur lequel il définit sa fonction d'utilité. Dans le scénario d'achat groupé d'énergie, un fournisseur d'énergie peut être évalué par sa fiabilité, ses services, s'il fournit ou non de l'énergie verte ; le tarif du *kWh* peut être évalué en fonction de l'évolution du prix au cours du temps. Formellement, chaque agent  $a_i$  possède sa propre fonction d'utilité  $u_{a_i} : \mathcal{P} \mapsto [0, 1]$ , où  $\mathcal{P}$  est l'ensemble des propositions. Les fonctions d'utilité des agents sont des informations privées.

Avant la négociation, chaque agent  $a_i$  définit ses aspirations comme présentées dans le chapitre 3, c'est-à-dire, sa zone d'accords possibles :  $Umin_{a_i}$  est la valeur d'utilité minimale que l'agent peut accepter, et  $Umax_{a_i}$  est la valeur d'utilité maximale au-dessus de laquelle toute proposition est acceptable. En fait, l'agent définit cette valeur à partir de la meilleure proposition qu'il peut suggérer. Cette proposition est définie selon ses propres connaissances qui sont souvent limitées. Donc au cours de la négociation, il peut recevoir d'autres propositions qui sont au-delà de ses aspirations. Évidemment, un agent étant rationnel, acceptera toute proposition qui est au-dessus de ses aspirations.

---

2. Il est nécessaire de préciser que l'ensemble des attributs est prédéfini par le concepteur. Les règles du protocole imposent aux agents de ne négocier que sur les attributs prédéfinis.

### 3 Communication entre les agents

Soit  $\mathcal{O} = \{Propose, Accepte, Refuse, Renforce, Attaque\}$  l'ensemble des actes du langage que les agents utilisent pour interagir entre eux.  $p_\alpha^i$  signifie que la proposition  $p_\alpha$  est soumise par l'agent  $a_i$ . Nous formalisons les actes du langage définis ci-dessus comme suit :

$Propose(a_i, \mathcal{A}g_x, p_\alpha^i, argp_\alpha^{i+})$  :  $a_i \in \mathcal{A}g_x$  soumet  $p_\alpha^i$  avec des arguments positifs  $argp_\alpha^{i+} \subseteq Argp_\alpha^{i+}$  à  $\forall a_j \in \mathcal{A}g_x$

$Accepte(a_i, \mathcal{A}g_x, p_\alpha^r)$  :  $a_i \in \mathcal{A}$  envoie un message d'acceptation concernant la proposition  $p_\alpha^r$  soumise par l'agent  $a_r \in \mathcal{A}g_x$  à  $\forall a_j \in \mathcal{A}g_x$ .

$Refuse(a_i, \mathcal{A}g_x, p_\alpha^r)$  :  $a_i \in \mathcal{A}$  envoie un message de refus concernant la proposition  $p_\alpha^r$  soumise par l'agent  $a_r \in \mathcal{A}g_x$  à  $\forall a_j \in \mathcal{A}g_x$ .

$Attaque(a_i, \mathcal{A}g_x, p_\alpha^r, argp_\alpha^{r-})$  :  $a_i \in \mathcal{A}$  envoie un message d'attaque concernant la proposition  $p_\alpha^r$  soumise par l'agent  $a_r \in \mathcal{A}g_x$  à  $\forall a_j \in \mathcal{A}g_x$  avec des arguments négatifs  $argp_\alpha^{r-} \subseteq Argp_\alpha^{r-}$ .

$Renforce(a_i, \mathcal{A}g_x, p_\alpha^r, argp_\alpha^{r+})$  :  $a_i \in \mathcal{A}$  envoie un message de renforcement concernant la proposition  $p_\alpha^r$  soumise par l'agent  $a_r \in \mathcal{A}g_x$  à  $\forall a_j \in \mathcal{A}g_x$ , avec un ensemble d'arguments positifs  $argp_\alpha^{r+} \subseteq Argp_\alpha^{r+}$ .

Comme détaillé dans le chapitre 3, chaque proposition  $p_\alpha$  soumise par un agent est évaluée selon son taux d'acceptation, de renforcement, de refus, d'attaque, sa valeur de support, sa valeur de satisfaction sociale et son estampille. Formellement, ces valeurs sont représentées respectivement par :  $\mathcal{T}_{p_\alpha}^{ac}, \mathcal{T}_{p_\alpha}^{re}, \mathcal{T}_{p_\alpha}^{rf}, \mathcal{T}_{p_\alpha}^{at}, \nu_{p_\alpha} = \frac{\mathcal{T}_{p_\alpha}^{ac} + \mathcal{T}_{p_\alpha}^{re}}{\mathcal{T}_{p_\alpha}^{rf}, \mathcal{T}_{p_\alpha}^{at} + 1}, ws(p_\alpha), \epsilon_{p_\alpha}$ .

## V. Protocole de négociation

### 1 Phase de formation des groupes

Les sous-ensembles d'attributs des agents peuvent se chevaucher.

**EXEMPLE 11** Soit  $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$  un ensemble de foyers qui négocient pour établir un contrat d'énergie dont les attributs  $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5$  désignent respectivement Fournisseur, Produit, Tarif, Durée du contrat, Mode de paiement. Considérons que les agents ont effectué les choix suivants :  $E_{a_1} = (e_1, e_2, e_3)$ ,  $E_{a_2} = (e_2, e_3)$ ,  $E_{a_3} =$

$(e_1, e_5)$ ,  $E_{a_4} = (e_1, e_2)$ ,  $E_{a_5} = (e_1, e_4, e_5)$ . Ainsi, les choix de  $a_1$  et de  $a_2$  se chevauchent et ceux de  $a_2$  et  $a_5$  sont disjoints.

Les sous-ensembles d'attributs des agents sont des informations publiques mais les valeurs que les agents donnent à leurs attributs sont des informations privées qu'ils révéleront à travers leurs propositions durant la phase de la négociation. Autrement dit, à l'étape de la formation des groupes initiaux, chaque agent ne connaît que son espace de solution portant sur son sous-ensemble d'attributs.

La formation des groupes se fait de manière décentralisée, c'est-à-dire qu'il n'existe aucune unité de contrôle. Chaque agent choisit lui-même les autres agents avec lesquels il veut former un groupe. Chaque agent cherche à former un groupe avec ceux avec lesquels il partage le maximum d'attributs.

Initialement, un agent ne peut pas appartenir à plusieurs groupes en même temps. Le processus de formation de groupes s'effectue comme suit :

**étape 1** : classement des agents. Chaque agent  $a_i$  classe en ordre décroissant les agents selon le nombre d'attributs qu'il partage avec eux.

**étape 2** : la formation des groupes suivant l'ordre de classement des agents.

Soit  $\gamma_i = |E_{a_i}|$  le nombre d'attributs de l'agent  $a_i$ . Nous désignons par  $\mathcal{C}_{O_{a_i}} = O_{\gamma_i}, O_{\gamma_i-1}, O_{\gamma_i-2}, \dots, O_0$  le classement de  $a_i$  représentant respectivement l'ensemble des agents avec lesquels il partage  $\gamma_i$  attributs, l'ensemble des agents avec lesquels il partage  $\gamma_i - 1$  attributs, l'ensemble des agents avec lesquels il partage  $\gamma_i - 2$  attributs etc. (voir TABLE 4.1).

**EXEMPLE 12** Suite de l'exemple 11 : l'agent  $a_1$  a  $\gamma_1 = 3$  attributs. Son classement est le suivant :  $\mathcal{C}_{O_{a_1}} = \{O_3 = \emptyset, O_2 = \{a_2, a_4\}, O_1 = \{a_3, a_5\}, O_0 = \emptyset\}$

agent $a_i$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
$E_{a_i}$	$e_1, e_2, e_3$	$e_2, e_3$	$e_1, e_5$	$e_1, e_2$	$e_1, e_4, e_5$
$\gamma_i$	$\gamma_1 = 3$	$\gamma_2 = 2$	$\gamma_3 = 2$	$\gamma_4 = 2$	$\gamma_5 = 3$
$O_{\gamma_i}$	$O_3 = \emptyset$	$O_2 = \{a_1\}$	$O_2 = \emptyset$	$O_2 = \{a_1\}$	$O_3 = \emptyset$
$O_{\gamma_i-1}$	$O_2 = \{a_2, a_4\}$	$O_1 = \{a_4, a_5\}$	$O_1 = \{a_1, a_4, a_5\}$	$O_1 = \{a_3, a_5, a_2\}$	$O_2 = \emptyset$
$O_{\gamma_i-2}$	$O_1 = \{a_3, a_5\}$	$O_0 = \{a_3\}$	$O_0 = \{a_2\}$	$O_0 = \emptyset$	$O_1 = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$
	$O_0 = \emptyset$	--	--	--	$O_0 = \emptyset$

TABLE 4.1: Classement des agents de l'exemple 11.

La formation des groupes d'agents s'effectue en plusieurs tours et de façon hiérarchique.

---

**Algorithm 1** formation de groupes

---

```
for  $a_i \in \mathcal{A}$  do  
   $sends(E_{a_i})$  to  $\forall a_j \in \mathcal{A} \setminus \{a_i\}$   
   $receives(E_{a_j})$  from  $\forall a_j \in \mathcal{A} \setminus \{a_i\}$   
  for  $k \in \{0, \dots, \gamma_i\}$  do  
     $O_{\gamma_i-k} \leftarrow agentsSameAttributes(\gamma_i - k)$   
  end for  
   $selectSubset(O_{\gamma_i-k})$  such as  $O_{\gamma_i-k} \neq \emptyset$   
  and  $V(O_{\gamma_i-k}) = Max(V(O_{\gamma_i-k}))$   
   $a_i$   $sends$   $requesToFormGroup(a_i, a_j)$  to  $\forall a_j \in O_{\gamma_i-k}$   
  while  $a_i$   $receives(requesToFormGroup(a_r, a_i))$  do  
    if  $a_r \in O_{\gamma_i-k}$  then  
       $a_i$   $sends$   $acceptToFormGroup(a_r, a_i)$   
    end if  
  end while  
end for
```

---

Au premier tour, chaque agent  $a_i$  demande aux agents avec lesquels il partage le maximum d'attributs à former un groupe. Un agent  $a_j$  accepte la demande de  $a_i$  si ce dernier appartient au premier sous-ensemble non vide de son classement (étape 1 de la figure 4.1) et forme un groupe avec celui-ci. Si un autre agent  $a_k$  accepte une demande de  $a_j$ , il rejoint le groupe de  $a_j$ . Une fois qu'un agent a accepté une demande, il ne peut plus accepter une autre demande (étape 2 de la figure 4.1), mais il peut continuer à faire évoluer son groupe et demander à d'autres agents de rejoindre celui-ci (étape 3 de la figure 4.1).

Après le premier tour, certains agents peuvent n'appartenir à aucun groupe. Dans ce cas, le processus de formation des groupes est poursuivi. Au deuxième tour, les agents procèdent de la même façon en considérant les agents appartenant à leur deuxième sous-ensemble d'agents (non vide). Cependant, un agent étant déjà dans un groupe ne peut plus accepter les demandes des autres mais par contre, il peut demander à d'autres agents de rejoindre son groupe.

Ce processus continue jusqu'à ce que tous les agents rejoignent un groupe.

## 2 Phase de négociation

Le protocole de négociation proposé s'appuie, en partie, sur le modèle présenté au chapitre 3. La négociation s'effectue en plusieurs tours et à l'issue de chaque tour, un point de contrôle est effectué pour vérifier s'il existe une alliance gagnante. Les échanges de propositions s'effectuent simultanément dans chaque groupe.

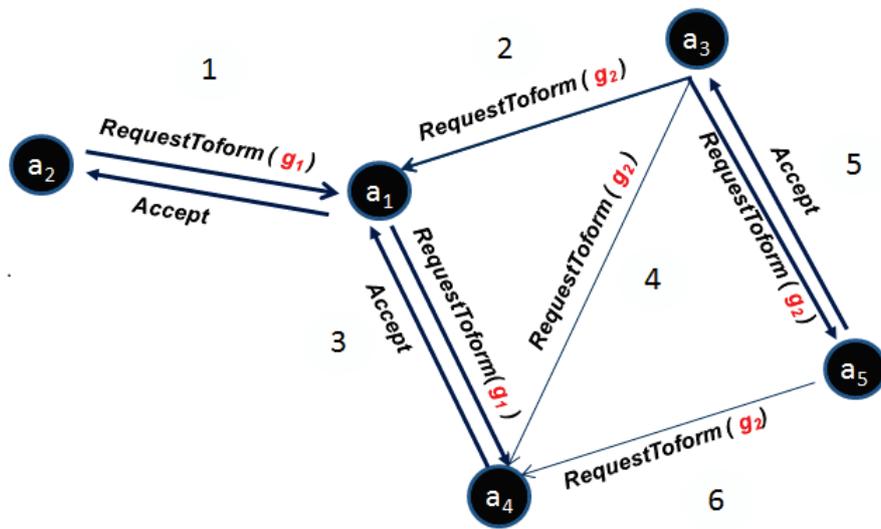


FIGURE 4.1: Processus de formation de groupes initiaux.

Sur cette figure, les nœuds représentent les agents et les flèches représentent leurs interactions. Nous avons cinq agents qui interagissent pour former des groupes.

1 : l'agent  $a_2$  crée un groupe et demande à  $a_1$  de le rejoindre. Ensuite,  $a_1$  accepte sa demande.

2 : l'agent  $a_3$  demande à  $a_1$  de rejoindre son groupe. En ce moment,  $a_1$  a déjà formé un groupe avec  $a_2$ , donc il répond pas à la demande de  $a_3$ .

3 : l'agent  $a_1$  étant déjà dans le groupe de  $a_2$  demande à  $a_4$  de rejoindre ce groupe et ensuite,  $a_4$  accepte sa demande.

4 : l'agent  $a_3$  demande à  $a_4$  de rejoindre son groupe mais ce dernier ne répond pas car il appartient déjà à un groupe.

5 : l'agent  $a_3$  demande à  $a_5$  de rejoindre son groupe et ce dernier accepte.

6 : l'agent  $a_5$  demande à  $a_4$  de rejoindre son groupe et ce dernier ne répond pas.

Les cinq agents forment deux groupes  $g_1 = \{a_1, a_2, a_4\}$  et  $g_2 = \{a_3, a_5\}$  à la fin du processus.

Les agents négocient selon leurs aspirations (zone d'accords possibles). Les règles d'interaction  $R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}, R_{i4}$  définies dans le chapitre 3 sont aussi applicables pour ce protocole. Cependant, dans le chapitre 3, les agents s'organisent en groupes dans lesquels ils s'échangent des propositions. Chacun tente de faire accepter sa proposition par la majorité des agents en se déplaçant également dans les groupes tout en respectant les règles de mobilité établies. Le protocole continue ainsi jusqu'à l'obtention d'une proposition majoritaire ou jusqu'à la date limite. Ce protocole s'adapte bien au contexte de négociation sur un seul attribut alors qu'ici nous abordons les négociations multilatérales sur plusieurs attributs dans lesquelles chaque agent peut s'intéresser à une partie des attributs.

Le protocole de négociation proposé dans ce présent chapitre, répartit initialement les agents en groupes selon la similarité de leur sous-ensemble d'attributs (voir Figure 4.2). Les agents de chaque groupe négocient en échangeant leurs propositions. Lorsqu'un sous-ensemble d'agents accepte une proposition éventuellement partielle, ils forment une alliance. Pour obtenir une solution finale de négociation, les alliances doivent fusionner leurs propositions. Pour ce faire, elles forment à leur tour de nouveaux groupes pour procéder à une fusion simple de leurs propositions ou pour renégocier sur les attributs en conflit. Pour ce nouveau contexte, nous définissons de nouvelles règles et des stratégies permettant de faciliter la recherche de solutions collectivement satisfaisantes.

### Négociation à l'intérieur d'un groupe

Dans chaque groupe, les agents négocient sur les attributs qu'ils ont en commun. Chaque agent  $a_i$  soumet des propositions qui concernent les attributs qui l'intéressent et il évalue avec sa fonction d'utilité  $u_{a_i}$  les propositions des autres agents selon les attributs qu'ils ont en commun.

**EXEMPLE 13** Prenons le cas des agents de l'exemple 11. Les agents forment deux groupes  $g_1, g_2$  (cf Figure 4.1) :

$Ag_1 = \{a_1, a_2, a_4\}$  est l'ensemble des agents appartenant à  $g_1$ ,  $E_{g_1} = \{e_1, e_2, e_3, e_5\}$  est l'ensemble des attributs sur lesquels les agents de  $g_1$  vont négocier.

$Ag_2 = \{a_3, a_5\}$ , est l'ensemble des agents appartenant à  $g_2$ ,  $E_{g_2} = \{e_1, e_4, e_5\}$  est l'ensemble des attributs sur lesquels les agents de  $g_2$  vont négocier.

Soit  $val^i(e_k)$  la valeur que l'agent  $a_i$  donne à l'attribut  $e_k$ . Supposons que dans le groupe  $g_1$ , les agents  $a_1, a_2, a_3$  ont soumis respectivement les propositions suivantes :

$$p_1 = (val^1(e_1), val^1(e_2), val^1(e_3)),$$

$$p_2 = (val^2(e_2), val^2(e_3)),$$

$$p_4 = (val^4(e_1), val^4(e_2)).$$

Lorsque, par exemple, l'agent  $a_1$  reçoit les propositions de  $p_2$  et  $p_4$ , il calcule l'utilité de chacune de ces propositions en ne considérant que les attributs en commun :

$$u_{a_1}(p_2) = u_{a_1}(val^1(e_1), val^2(e_2), val^2(e_3)).$$

$$u_{a_1}(p_4) = u_{a_1}(val^4(e_1), val^4(e_2), val^1(e_3)).$$

Chaque agent  $a_i$  prend ses décisions (accepter, refuser, renforcer ou attaquer) par rapport à une proposition en fonction de sa zone d'accords possibles, c'est-à-dire, son intervalle d'utilité  $[U_{min_{a_i}}, U_{max_{a_i}}]$ . Selon les règles d'interaction, un agent peut accepter plusieurs propositions. De ce fait, plusieurs alliances peuvent se former au sein d'un groupe et chaque agent peut appartenir à une ou plusieurs alliances. Un agent qui n'a accepté aucune proposition n'appartient à aucune alliance.

Nous définissons une politique d'interaction entre les groupes afin de rendre flexible la négociation et de faciliter la recherche d'accord.

### Négociation inter-groupes

La communication inter-groupes s'effectue via l'écoute flottante. Chaque agent peut écouter les échanges qui s'effectuent dans les autres groupes pour prendre connaissance des propositions y sont soumises. Nous utilisons ici une variante de la politique d'interaction FIC présentée dans le chapitre 3. L'objectif est de faciliter la convergence de la négociation. Nous définissons de nouvelles règles d'interaction inter-groupes qui s'adaptent au contexte du protocole. Les écoutes d'un agent se limitent aux groupes dans lesquels les attributs négociés l'intéressent. Nous formalisons cette règle comme suit :

$\mathbf{R}_{i5}$  : tout agent  $a_i \in g_x$  peut écouter tout groupe  $g_y \in \mathcal{G}, g_y \neq g_x$ , si  $E_{a_i} \cap E_{g_y} \neq \emptyset$ .

Dans les exemples 11, 13, l'agent  $a_1$  du groupe  $g_1$  peut écouter les échanges dans le groupe  $g_2$  car  $E_{a_1} \cap E_{g_2} = e_1$ . Par contre, l'agent  $a_2$  n'a aucun intérêt à écouter le groupe  $g_2$  car  $E_{a_2} \cap E_{g_2} = \emptyset$ . Aucune des propositions soumises dans ce groupe ne l'intéresse.

$\mathbf{R}_{i6}$  : chaque agent  $a_i$  ayant pris connaissance des propositions soumises dans un autre groupe peut soit accepter, soit refuser soit attaquer ces propositions.

La règle d'interaction  $\mathbf{R}_{i6}$  fait que des agents appartenant à des groupes différents peuvent former des alliances. La figure 4.2 présente un exemple de configurations possibles des groupes et des alliances durant une négociation entre douze agents formant trois groupes  $g_1, g_2, g_3$ . Un agent n'appartenant à aucune alliance peut aussi se déplacer dans un nouveau groupe pour soumettre ses propositions s'il estime qu'elles seront mieux défendues dans ce groupe (Page 73). Ici les déplacements sont uniquement autorisés pour les agents n'appartenant à aucune alliance et ayant un intérêt dans un autre groupe. Un agent peut rejoindre une alliance à n'importe quel

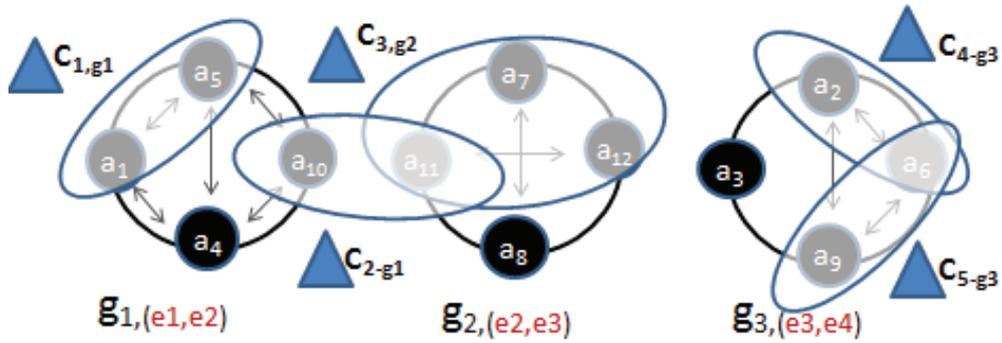


FIGURE 4.2: Structure des groupes et d'alliances. Sur cette figure, nous représentons douze agents repartis en trois groupes  $g_1, g_2, g_3$ . Les nœuds représentent les agents et les triangles coloriés en bleu représentent les alliances qui sont formées. Les cercles en noir sont les groupes dans lesquels les agents négocient et les ellipses en bleu montrent les agents qui forment les alliances. Nous désignons par  $C_{j,g_x}$  une alliance formée dans  $g_x$ . Par exemple, l'alliance  $C_{2,g_1}$  est formée parce que l'agent  $a_{11} \in g_2$  a accepté la proposition de  $a_{10}$  soumise dans  $g_1$ .

moment de la négociation dès qu'il accepte une proposition de ce groupe.

#### La formation d'alliances

Une alliance est formée par au moins deux agents lorsqu'ils ont accepté une même proposition. L'objectif est que les agents unissent leurs forces afin de mieux défendre leur proposition lorsqu'ils feront face à d'autres propositions portant sur des attributs en commun. Les agents formant une alliance définissent une nouvelle zone d'accords possibles commune en agréant leurs aspirations. Dans ce chapitre, nous supposons que chaque alliance négocie selon un intervalle d'utilité  $[U_{min_c}, U_{max_c}]$  représentant sa zone d'accords possibles.  $U_{min_c}$  est la valeur d'utilité minimum en dessous de laquelle aucune proposition n'est acceptable,  $U_{max_c}$  est la valeur d'utilité maximum au-dessus de laquelle toute proposition est acceptable. Les stratégies d'agrégation d'aspirations des agents formant une alliance ne font pas l'objet de ce chapitre.

Dans une alliance, chaque agent évalue une proposition en fonction de sa propre fonction d'utilité et prend des décisions en fonction de l'intervalle d'utilité de son alliance. Cela signifie qu'un agent refuse et attaque une proposition si son utilité est inférieure à  $U_{min_c}$ , sinon il peut l'accepter et/ou la renforcer. Ainsi, les agents sont amenés à faire des concessions en acceptant des propositions qu'ils auraient refusées en considérant leur propre intervalle d'utilité.

Au cours de la négociation, plusieurs alliances peuvent se former. Chacune vise à obtenir un nombre maximal d'agents avec une proposition abordant tous les problèmes. À cette fin, elle doit fusionner avec d'autres alliances.

Un agent peut rejoindre une alliance à tout moment de la négociation en acceptant la proposition défendue par cette alliance. Un agent ne peut pas quitter une alliance car il ne peut pas refuser une proposition qu'il a déjà acceptée. Mais il peut rejoindre une autre alliance en acceptant une autre proposition (règle  $R_{i3}$ ).

### Interaction entre alliances

Selon la répartition des agents en groupes et les règles d'interaction, nous identifions trois types de relations entre les alliances :

*Relation du type  $link_A$*  : deux alliances  $c_{1,g_x}, c_{2,g_x}$  formées dans un même groupe  $g_x$  sont liées par une relation du type  $link_A$  si elles possèdent des agents en commun. Formellement  $c_{1,g_x} \cap c_{2,g_x} \neq \emptyset$ . Ce type de relation peut bien exister entre les alliances car la règle ( $R_{i3}$ ) autorise à chaque agent d'accepter plusieurs propositions.

*Relation du type  $link_E$*  : deux alliances  $c_{1,g_x}, c_{2,g_y}$  formées dans deux groupes différents  $g_x, g_y$  sont liées par une relation du type  $link_E$  si leurs propositions portent sur des attributs en commun. Formellement,  $E_{g_x} \cap E_{g_y} \neq \emptyset$ . Ce type de relation peut bien exister entre les alliances lorsque les groupes dans lesquels ces alliances sont formées négocient sur des attributs en commun.

*Relation du type  $link_{FIC}$*  : deux alliances  $c_{1,g_x}, c_{2,g_y}$  formées dans deux groupes différents  $g_x, g_y$  sont liées par une relation du type  $link_{FIC}$  si elles possèdent des agents en commun. Formellement  $c_{1,g_x} \cap c_{2,g_y} \neq \emptyset$ . Ce type de relation peut bien exister entre les alliances car la politique d'interaction inter-groupes donne la possibilité à tout agent d'accepter des propositions soumises en dehors de son groupe.

Dans la figure 4.2, les couples d'alliances  $(c_{4,g_3}, c_{5,g_3}), (c_{3,g_2}, c_{4,g_3}), (c_{2,g_1}, c_{3,g_2})$  sont respectivement liés par des relations de types  $link_A, link_E$  et  $link_{FIC}$ .

**Formation de groupes d'alliances** : les groupes d'alliances sont considérés ici comme un espace d'échange entre des alliances pour fusionner leurs propositions : *fusion simple* ou *affinement*. Les groupes d'alliances se forment exclusivement entre des alliances de groupes différents. Les alliances qui sont formées au sein du même

groupe ne peuvent pas former à nouveau un groupe d’alliances pour fusionner des propositions qui ont déjà fait l’objet de désaccords entre certains agents (voir Figure 4.3).

Chaque alliance cherche à former un groupe avec les alliances les plus bénéfiques pour elle, c’est-à-dire, celles qui lui permettent de devenir plus rapidement l’alliance dominante. Rappelons que la négociation s’effectue sur une durée limitée et qu’elle prend fin dès qu’au moins une alliance ayant la majorité des agents supportant une proposition complète est trouvée lors d’un point de contrôle. Une alliance est donc évaluée en fonction de deux critères : le nombre d’agents (sa taille) et le nombre d’attributs sur lesquels porte la proposition qu’elle défend. Le

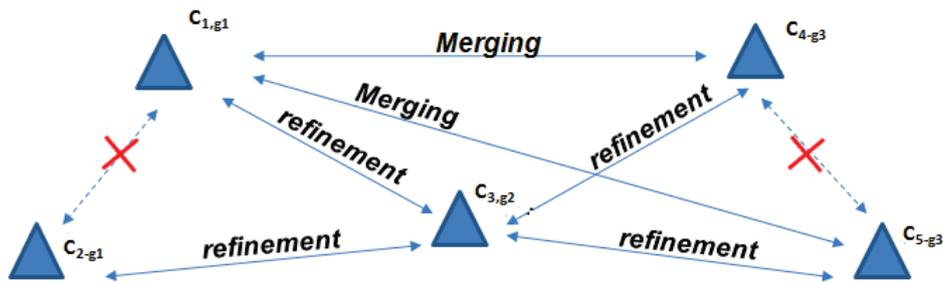


FIGURE 4.3: Fusion d’alliances. Sur cette figure, nous représentons les cinq alliances formées par les agents (voir figure 4.2 et les opérations qui peuvent s’effectuer entre eux). La flèche étiquetée par *Merging* qui relie deux alliances montre que celles-ci ne partagent aucun attribut. Donc lorsqu’elles forment un groupe, elles vont fusionner leurs propositions. La flèche étiquetée par *refinement* qui relie deux alliances montre que celles-ci vont renégocier sur les attributs qu’elles ont en commun lorsqu’elles formeront un groupe. Le croix sur une flèche qui relie deux alliances montre que celles-ci ne peuvent pas former un groupe.

processus de formation de groupes d’alliances est décentralisé. Chaque alliance choisit elle-même les alliances avec lesquelles elle forme un groupe.

Formellement, nous désignons par  $f_m$  et  $f_r$  les opérations de *fusion simple* et d’*affinement*. Ces opérations s’appliquent au moins sur deux propositions défendues par deux alliances différentes. Les alliances décident de fusionner simplement ou d’affiner leurs propositions en fonction du gain attendu et du coût de l’opération. Le coût d’un processus de fusion entre deux alliances est évalué selon le nombre d’attributs à renégocier et le nombre d’agents concernés (Équation 4.1).

Le gain est évalué selon le nombre d’attributs sur lesquels portera la proposition résultante de l’opération de fusion et la taille (en nombre d’agents) de la nouvelle

alliance qui sera formée (Équation 4.2).

Le coût et le gain sont donnés respectivement par les fonctions  $f_{cost}$  et  $f_{gain}$  définies comme suit :

$$f_{cost}(c_x, c_y) = \frac{|E_{c_x} \cap E_{c_y}|}{|E_{c_x} \cup E_{c_y}|} \times \frac{|\mathcal{A}_{c_x} \cup \mathcal{A}_{c_y}| - |\mathcal{A}_{c_x} \cap \mathcal{A}_{c_y}|}{|\mathcal{A}_{c_x} \cup \mathcal{A}_{c_y}|}. \quad (4.1)$$

$$f_{gain}(c_x, c_y) = \frac{|E_{c_x} \cup E_{c_y}|}{k} \times \frac{|\mathcal{A}_{c_x} \cup \mathcal{A}_{c_y}|}{n}. \quad (4.2)$$

$n, k$  représentent respectivement le nombre d'agents dans le système et le nombre d'attributs.  $(c_x, c_y)$  sont deux alliances différentes mais le coût et le gain peuvent se généraliser pour plus de deux alliances. Il existe d'autres approches et critères d'évaluation [32]. Cependant, les critères et l'approche choisis s'adaptent à notre contexte.

**Propriété 8** *Le coût d'une fusion simple est toujours égal à zéro*

**Preuve** Une fusion simple s'effectue lorsque les propositions des alliances n'ont aucun attribut en commun i.e.,  $E_{c_x} \cap E_{c_y} = \emptyset \Leftrightarrow |E_{c_x} \cap E_{c_y}| = 0 \Rightarrow f_{cost}(c_x, c_y) = 0$ .

Nous définissons par  $u(c_x, c_y) = f_{gain}(c_x, c_y) - f_{cot}(c_x, c_y)$  l'utilité espérée d'une alliance  $c_x$  si elle forme un groupe avec une autre alliance  $c_y$ . Chaque alliance acceptera de former un groupe avec les alliances qui maximisent son utilité.

**Processus de fusion simple des alliances** : des propositions n'ayant aucun attribut en commun peuvent être fusionnées. Leur fusion consiste à créer une nouvelle proposition contenant tous les attributs des propositions impliquées. Dans la figure 4.2, supposons que les alliances  $c_{1,g_1}$  et  $c_{4,g_3}$  défendent respectivement les propositions  $p_1 = (v(e_1), v(e_2))$  et  $p_2 = (v(e_3), v(e_4))$ .  $v(e_i)$  est la valeur de  $e_i$  acceptée par une alliance. La proposition résultante de la fusion est la suivante :  $p_\alpha = f_m(p_1, p_2) = (v(e_1), v(e_2), v(e_3), v(e_4))$  avec  $f_m$  la fonction de fusion. Le processus de fusion s'effectue de façon simple car il n'existe aucun conflit entre les alliances (aucun attribut en commun). Il s'agit alors d'une combinaison des différentes solutions partielles afin de construire une solution complète soutenue par un nombre maximum d'agents.

**Processus d'affinement des propositions** : les propositions ayant des attributs en commun sont fusionnées en négociant sur les attributs en conflit. Un processus d'affinement entre deux alliances consiste à trouver un accord sur chaque attribut

en conflit. Chaque agent peut soumettre une nouvelle proposition en ne modifiant que les valeurs des attributs en conflit. Supposons que deux alliances supportant respectivement les propositions  $p_1 = (v(e_1), v(e_3), v(e_4))$  et  $p_2 = (v(e_2), v(e_3), v(e_5))$  forment un groupe pour renégocier leurs propositions. Une nouvelle proposition soumise est :  $p_\alpha = (v(e_1), v(e_2), set(v(e_3)), v(e_4), v(e_5))$  avec  $set(v(e_3))$  une nouvelle valeur de l'attribut  $e_3$ . Seule la valeur de l'attribut  $e_3$  est modifiée au cours de cette étape de négociation.

### 3 Les points de contrôle

Le point de contrôle est la phase de vérification de l'existence d'au moins d'une alliance dominante, autrement dit, une proposition complète acceptée par la majorité des agents (solution acceptable). Les points de contrôle sont effectués en temps réguliers prédéfinis par le concepteur. Chaque agent a connaissance de la date des points de contrôle. Ces derniers permettent, éventuellement, de conclure si une solution est trouvée. À l'issue d'un point de contrôle, soit il existe une solution, auquel cas la négociation aboutit à un succès, soit il n'y en a pas de solution, auquel cas, la négociation continue tant que le temps de la négociation n'est pas encore expiré. Lorsqu'aucune solution est trouvée au dernier point de contrôle, la négociation se termine par un échec.

## VI. Complexité de la négociation

Dans le protocole de négociation proposé, les agents construisent une solution à leur problème en procédant à une combinaison simple de propositions partielles portant sur des attributs non partagés et à une négociation sur les attributs qu'ils ont en commun (attributs en conflit).

Dans une situation où chaque agent ne partage aucun attribut avec les autres, la solution finale de la négociation est une combinaison des valeurs que chaque agent donne aux attributs qui l'intéressent. Dans ce cas, il n'y a pas de négociation proprement dite (recherche du compromis). Aucun groupe de négociation n'est formé, chaque agent est une alliance singleton qui fusionne avec les autres alliances.

Dans une situation où chaque agent s'intéresse à tous les attributs, trouver une solution nécessite une négociation entre tous les agents sur tous les attributs. Dans ce cas, selon le processus de répartition des agents en groupes présenté dans ce chapitre (Page 90), un seul groupe de négociation sera formé et les agents procèdent à l'échange de leurs propositions. Cette situation est complexe car

chaque agent doit négocier avec tous les autres. Le protocole de négociation proposé dans le chapitre 3, peut être utilisé car chaque proposition d'un agent est complète, c'est-à-dire qu'elle porte sur tous les attributs et peut devenir la solution de la négociation si elle est acceptée par la majorité.

Dans une situation où tous les agents ne s'intéressent pas à tous les attributs, leurs sous-ensembles d'attributs peuvent avoir des attributs en commun et différents groupes de négociation seront formés. La complexité de la négociation dépend alors de la disparité entre les agents selon leur choix sur les attributs à négocier.

Formellement, nous désignons par  $Dc \in [0,1]$  le degré de complexité de la négociation.

**Définition 9** Soit  $m$  le nombre de groupes formés  $mc$  le nombre de groupes  $g_k \in \mathcal{G}$  tel que  $\exists g_q \in \mathcal{G}$  et  $E_{g_k} \cap E_{g_q} \neq \emptyset$ . le degré de complexité  $Dc = \frac{mc}{m}$ .

Le degré de complexité  $Dc$  exprime la complexité du processus de négociation et des interactions entre les alliances formées dans les différents groupes. Nous identifions trois niveaux de complexité selon la valeur de  $Dc$  :

- .  $Dc = 0$  lorsque tous les groupes initiaux formés sont disjoints, c'est-à-dire que  $\forall g_k \in \mathcal{G}, \nexists g_q \in \mathcal{G} / E_{g_k} \cap E_{g_q} \neq \emptyset$  d'où  $mc = 0$ . Par conséquent, les alliances formées dans les différents groupes ne partagent aucun attribut. Elles procèdent à la fusion de leurs propositions pour construire une proposition complète. Cette proposition deviendra la solution finale de la négociation lorsque l'alliance qui la supporte est constituée par la majorité des agents. Le processus de négociation est moins complexe comparé au cas où  $Dc > 0$ . Les agents ne changent pas de groupes et les échanges de messages sont moins importants car les négociations se limitent uniquement au sein des groupes initiaux. Les groupes d'alliances formées combinent uniquement leurs propositions sans la renégociation d'attributs. Ainsi, chaque agent choisit l'alliance avec laquelle il fusionne en fonction de sa taille, c'est-à-dire le nombre d'agents.

- .  $0 < Dc < 1$  lorsqu'il existe des groupes disjoints et des groupes ayant des attributs en commun, c'est-à-dire que  $\exists g_k, g_q \in \mathcal{G} / E_{g_k} \cap E_{g_q} \neq \emptyset$  d'où  $mc > 0$ . Dans ce cas, les alliances procèdent à une fusion simple et à une négociation des attributs en conflit (affinement).

- .  $Dc = 1$  lorsque chaque groupe partage certains attributs avec au moins un autre groupe, c'est-à-dire que  $\forall g_k \in \mathcal{G}, \exists g_q \in \mathcal{G} / E_{g_k} \cap E_{g_q} \neq \emptyset$  d'où  $mc = m$ . Les agents

procèdent à une négociation des attributs en conflit.

## VII. Conclusion

Ce chapitre a présenté un mécanisme de négociation multilatérale dans lequel les agents négocient sur plusieurs attributs. Nous nous sommes placés dans un contexte où certains agents peuvent s'intéresser qu'à une partie des attributs. En effet, ils choisissent les attributs sur lesquels ils souhaitent négocier en fonction de leurs besoins. Nous avons montré que dans un tel contexte, la négociation "au tour d'une seule table", comme celui du protocole des offres alternées, peut poser des difficultés pour la recherche d'accord collectif.

Ainsi, pour répondre à ces difficultés, nous avons proposé un mécanisme de négociation qui consiste à répartir les agents en plusieurs groupes en fonction des attributs qu'ils partagent. Cette répartition s'effectue de manière décentralisée. Chaque agent choisit les autres avec lesquels il veut former un groupe. L'objectif de la répartition des agents en plusieurs groupes est de permettre aux agents de négocier de façon incrémentale et efficace. Cela réduit la complexité de la négociation et permet aussi de limiter les coûts de traitements.

La négociation s'effectue simultanément dans chaque groupe et les agents membres tentent de trouver des solutions partielles concernant les attributs qu'ils ont en commun. Ces solutions partielles seront fusionnées progressivement durant la négociation pour établir une solution finale. Cette démarche progressive permet aux agents de mieux canaliser leurs interactions et cela peut faciliter la recherche d'accords. Chaque agent soumet des propositions ne portant que sur les attributs qui l'intéressent. Il évalue également les propositions qu'on lui soumet en fonction des attributs qui l'intéressent.

Dans ce mécanisme, nous avons introduit la formation d'alliances. Lorsqu'au moins deux agents acceptent la même proposition, ils forment une alliance pour ensuite défendre cette proposition auprès des autres agents qui appartiennent éventuellement à d'autres alliances. Lorsque des agents forment une alliance, ils définissent ensemble les stratégies qu'ils vont suivre pour défendre leur proposition.

Nous avons aussi analysé théoriquement le degré de complexité de notre mécanisme de négociation en fonction de la similarité entre les sous-ensembles

d'attributs des agents ainsi que la structure des groupes formés initialement. L'évaluation empirique de notre mécanisme de négociation est présentée dans le chapitre 6.

Le mécanisme de négociation multilatérale que nous avons proposé peut s'adapter dans plusieurs contextes de négociation. Cependant, il y a encore des points à améliorer. Par exemple, il serait intéressant de proposer une variante de notre mécanisme dans laquelle les attributs sur lesquels les agents négocient seront interdépendants. La prise en compte de l'interdépendance des attributs nécessitera de trouver d'autres mécanismes de formation de groupes et d'alliances.

Dans cette contribution, nous avons supposé que les agents accordent les mêmes importances à tous les attributs sur lesquels ils focalisent leurs négociations. Cependant, dans des situations réelles, les agents peuvent accorder à chaque attribut une importance différente. Ainsi, il peut adopter des stratégies différentes pour négocier chacun de ses attributs. La troisième contribution de cette thèse, abordée dans le chapitre suivant s'intéresse, d'une part, sur les stratégies de concession des agents en fonction du poids qu'ils donnent à chaque attribut. D'autre part, sur la structuration des offres à soumettre.



# Chapitre 5

## MÉCANISME DE NÉGOCIATION HIÉRARCHIQUE

*Dans ce chapitre, nous proposons un mécanisme de négociation multilatérale dans lequel les agents sont égoïstes et négocient sur plusieurs attributs. Chaque agent peut s'intéresser à une partie des attributs. Il accorde à chaque attribut qui l'intéresse un poids représentant son importance. Dans le modèle proposé, nous nous intéressons aux stratégies de concessions des agents, à la structure des offres permettant de faciliter la recherche d'accords collectifs. Le modèle d'organisation des agents s'appuie sur une structure hiérarchique. Les agents négocient sur les attributs qui les intéressent au fur et à mesure qu'ils rencontrent de nouveaux agents. Ils forment des alliances et définissent des stratégies de négociation communes pour mieux défendre leur intérêts.*

## I. Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons la négociation multi-attributs en mettant en exergue l'aspect organisationnel du système multi-agents et les stratégies de concession utilisées par les agents pour mener leurs négociations. Dans les modèles de négociation, présentés dans les chapitres 3 et 4, les agents accordent la même importance à tous les attributs. Dans un contexte réel, les agents donnent généralement des niveaux d'importance différents aux attributs. La stratégie de négociation de chaque agent pour chaque attribut peut dépendre de l'importance qu'il accorde à cet attribut. Dans ce chapitre, nous proposons un nouveau mécanisme de négociation multilatérale en tenant compte du poids que chaque agent assigne aux attributs sur lesquels il focalise sa négociation.

Le mécanisme de négociation multilatérale proposé consiste à répartir les agents en plusieurs groupes selon la similarité de leurs choix sur les attributs à négocier. Cette répartition se fait de façon centralisée. Nous supposons que les choix des agents sur les attributs à négocier sont des informations publiques. La négociation s'effectue simultanément dans chaque groupe. Les agents négocient de façon décentralisée, c'est-à-dire, sans médiateur. La négociation dans chaque groupe porte sur un sous-ensemble d'attributs commun à tous les agents appartenant à ce groupe. Chaque agent définit pour chaque attribut sur lequel il focalise sa négociation une stratégie de concession selon le poids de cet attribut. Ces stratégies de concession ont pour but de faciliter la recherche d'accords. La négociation s'effectue de manière itérative. À chaque tour, les agents membres de chaque groupe forment une alliance lorsqu'ils trouvent un accord. Au prochain tour, les alliances sont réparties en groupes dans lesquels elles négocient pour trouver des solutions concernant les attributs qu'elles ont en commun. La négociation continue jusqu'à ce que chaque agent échange avec tous les agents avec lesquels il partage des attributs. Ainsi, les agents construisent de manière progressive la solution finale de la négociation.

La formation d'alliances permet aux agents de définir des stratégies de décision communes pour négocier avec d'autres alliances [99, 89]. [89] aborde les négociations en équipes et proposent des stratégies de prise de décision pour chaque équipe lorsqu'elle négocie avec une autre. Dans leur approche, les décisions au sein d'une équipe sont coordonnées par un médiateur qui est un point de défaillance unique. Les équipes négociatrices sont statiques, c'est-à-dire que le nombre d'agents et d'attributs sont fixes. Dans notre protocole, les alliances se forment dynamiquement en impliquant plus d'agents et plus d'attributs dans leur

solution.

Comparé au modèle proposé dans le chapitre 4, dans ce mécanisme, les interactions entre les groupes ne sont pas autorisées. Seules les alliances partageant des attributs en commun forment des groupes. Les politiques d'interaction entre les groupes, définies dans nos deux précédentes contributions, ont pour but de rendre la négociation flexible afin de faciliter la recherche d'accords. Cependant, ces politiques d'interaction entre les groupes peuvent induire des coûts de communication supplémentaires. Les déplacements des agents peuvent provoquer des situations de blocage de la négociation si les interactions ne sont pas régies par des règles (cf chapitre 3). Dans cette troisième contribution, nous utilisons la politique d'interaction RIC évoquée dans la section 3. Les déplacements et les interactions entre les agents de différents groupes ne sont pas autorisés. Pour rendre la négociation flexible, nous mettons l'accent sur les tactiques de négociation telles que celles proposées dans [31, 32] et sur les offres que les agents vont soumettre.

## II. Présentation du modèle de négociation

Les agents négocient sur plusieurs attributs pour trouver un accord collectif concernant l'ensemble des attributs en jeu. Pour illustrer notre modèle, nous considérons l'exemple d'achat groupé d'énergie présenté dans le chapitre 4. L'approche proposée s'inspire des techniques de clustering hiérarchique bien connues dans le domaine du Datamining. L'objectif est de permettre aux agents d'établir de manière progressive une solution à leur problème (cf. Figure 5.1). Nous présentons ci-dessous quelques définitions :

**Définition 10** : *Un cluster est un espace dans lequel des sous-ensembles d'agents formant deux alliances interagissent en échangeant des propositions.*

**Définition 11** : *Une alliance est formée par un sous-ensemble d'agents qui sont en accord sur une proposition partielle ou complète.*

**Définition 12** : *Une proposition partielle est une combinaison de valeurs portant sur une partie des attributs en jeu.*

**Définition 13** : *Une proposition complète est une combinaison de valeurs portant sur tous les attributs en jeu.*

**Définition 14** : *Une solution de négociation acceptable est une proposition complète supportée par une alliance formée par la majorité des agents.*

Dans ce chapitre, nous utilisons les mots *cluster* et groupe de façon interchangeable.

Au début de la négociation, chaque agent est considéré comme une alliance singleton. À chaque tour de la négociation, les alliances sont réparties en plusieurs groupes disjoints appelés *clusters*. Chaque *cluster* est formé par deux alliances et les agents membres interagissent en échangeant leurs propositions. Chaque agent évalue chaque proposition qu'il reçoit et peut l'accepter, la refuser ou faire une contre-proposition.

Les agents d'un cluster ne négocient que sur les attributs qu'ils ont en commun à la différence du modèle présenté dans le chapitre 4 où les agents d'un groupe soumettent des propositions concernant tous les attributs qui les intéressent en même temps. Les agents se rejoignent et deviennent une nouvelle alliance lorsqu'ils s'accordent sur une proposition partielle ou complète. Sinon le *cluster* est dissout.

Les agents formant une nouvelle alliance déterminent ensemble des tactiques de négociation communes pour défendre leur proposition. Au prochain tour, les alliances sont réparties de nouveau en groupes de deux selon les règles de clustering que nous détaillons plus loin. Chaque fois que de nouveaux clusters sont créés, une autre phase de négociation s'effectue. La négociation s'arrête lorsqu'il n'est plus possible de créer de nouveaux clusters. Ainsi, les agents négocient pour construire progressivement et de façon hiérarchique la grande alliance formée par la majorité des agents ou la totalité supportant une proposition complète.

En résumé, le protocole de négociation proposé se décline en deux étapes exécutées de manière itérative :

Étape 1 : phase de partitionnement des agents. Elle est effectuée par le système et en fonction des informations publiques : les sous-ensembles d'attributs des agents. Nous définissons différentes fonctions de similarité permettant de générer les clusters.

Étape 2 : phase de négociation. Elle s'effectue simultanément dans chaque *cluster*. Les alliances négocient en échangeant leurs propositions pour établir des solutions (éventuellement partielles) concernant les attributs qu'elles ont en commun. Elles forment une seule alliance lorsqu'elles se mettent d'accord sur une proposition. Si aucun accord n'est trouvé, le *cluster* est dissout et chacune des alliances reste inchangée.

L'étape 2 de la négociation s'effectue à chaque fois que de nouveaux *clusters* sont formés à l'étape 1. La négociation se termine éventuellement par un ensemble d'alliances défendant chacune une solution partielle ou complète. La solution finale de la négociation est déterminée en combinant les solutions partielles portant sur des sous-ensembles d'attributs disjoints. La combinaison des solutions partielles est effectuée par le système qui fournit la solution équitable et juste lorsqu'elle existe.

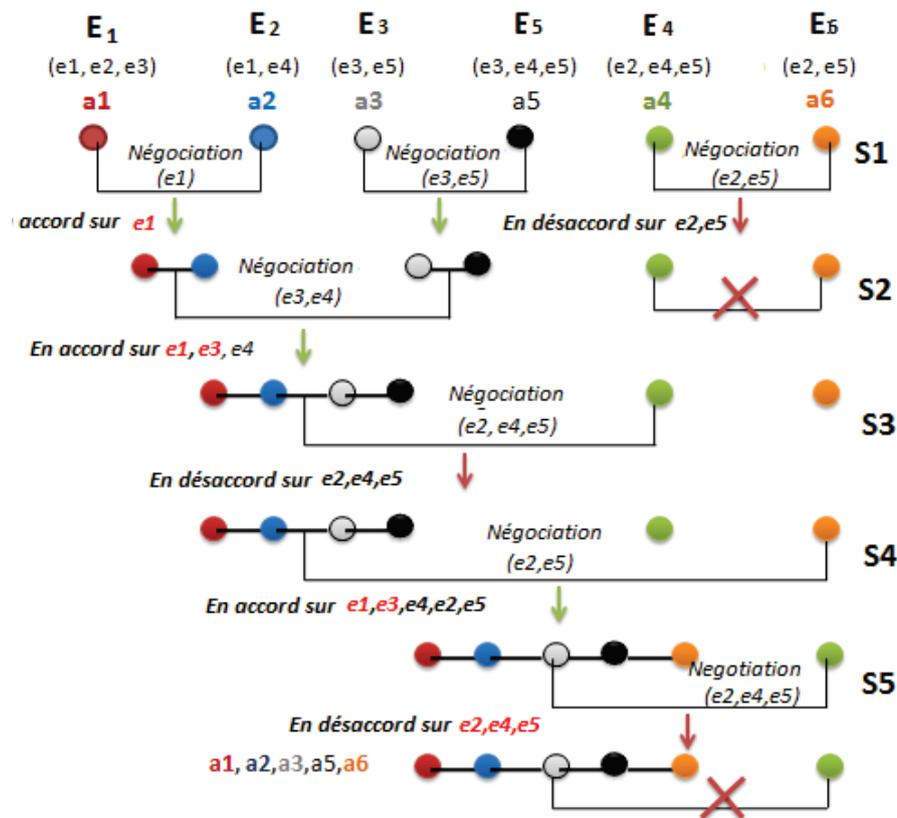


FIGURE 5.1: Déroulement de la négociation : Nous avons dans cette figure six agents  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$  qui négocient sur cinq attributs  $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5$ . Les nœuds de couleurs différentes représentent les agents. Les traits horizontaux reliant plusieurs nœuds représentent les alliances. Les lignes brisées ouvertes reliant deux agents ou deux alliances représentent les clusters. La croix en rouge sur un cluster montre que celui-ci ne peut se former. Les flèches dirigées vers le bas et qui sont placées en dessous de chaque cluster indiquent le résultat de la négociation qui s'est effectuée dans ce cluster. Soit une nouvelle alliance s'est formée, soit le cluster est dissout.

Déroulement du processus de négociation représenté dans la figure 5.1 :

La négociation s'effectue en plusieurs tours et de façon hiérarchique.  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  désignent les différentes phases de négociation.

Pendant la phase  $S_1$ , les six agents sont répartis en trois clusters formés respectivement des agents  $\{a_1, a_2\}$ ,  $\{a_3, a_5\}$  et  $\{a_4, a_6\}$ . Les agents dans chaque cluster négocient sur les attributs qu'ils ont en commun. Ils forment une alliance lorsqu'ils trouvent un accord sur chaque attribut. À l'issue de la phase  $S_1$ ,  $a_1$  et  $a_2$  forment une alliance, ainsi que  $a_3$  et  $a_5$ . Par contre, la négociation entre  $a_4$  et  $a_6$  débouche sur un désaccord.

Pendant la phase  $S_2$ , les alliances formées respectivement des agents  $\{a_1, a_2\}$  et  $\{a_3, a_5\}$  sont regroupées dans un cluster où elles négocient sur les attributs qu'elles ont en commun. Leur négociation aboutit à un accord concernant les attributs  $e_3$  et  $e_4$ . Les agents  $a_4$  et  $a_6$  ne participent pas à la négociation durant cette phase. À l'issue de la phase  $S_2$ , Les agents  $\{a_1, a_2, a_3, a_5\}$  supporte une proposition partielle portant sur les attributs  $e_1, e_3$  et  $e_4$ .

Pendant la phase  $S_3$ , les alliances  $\{a_1, a_2, a_3, a_5\}$  et  $\{a_4\}$  forment un cluster et négocient sur les attributs qu'elles ont en commun. Leur négociation débouche sur un désaccord.  $a_6$  ne participe pas à la négociation durant cette phase car il appartient à aucun cluster. À l'issue de la phase  $S_3$  aucune nouvelle alliance n'est formée.

Pendant la phase  $S_4$ , les alliances constituées respectivement des agents  $\{a_1, a_2, a_3, a_5\}$  et  $\{a_6\}$  forment un cluster et négocient sur les attributs qu'elles ont en commun. Leur négociation aboutit à un accord concernant les attributs  $e_2$  et  $e_5$ .  $a_4$  ne participe pas à la négociation durant cette phase car il n'appartient à aucun cluster. À l'issue de la phase  $S_4$ , l'alliance formée des agents  $\{a_1, a_2, a_3, a_5, a_6\}$  supporte une proposition complète portant sur tous les cinq attributs. Chaque agent a négocié avec tous les autres agents avec lesquels il partage des attributs. Aucun nouveau cluster n'est formé et la négociation se termine.

L'alliance  $\{a_1, a_2, a_3, a_5, a_6\}$  détient plus que la majorité des agents et elle supporte une proposition complète. Celle-ci devient alors la solution de la négociation.

### III. Formalisation du modèle

*Agents et Attributs* : soit  $\mathcal{A} = \{a_1, \dots, a_n\}$  l'ensemble des agents et  $E$  l'ensemble des attributs sur lesquels porte la négociation. Soit  $e \in E$  un attribut de l'ensemble  $E$ ,  $D_e$  est le domaine de valeurs de  $e$ , i.e., l'ensemble fini dans lequel l'attribut  $e$  peut prendre ses valeurs. Nous désignons par  $\varepsilon_e \in D_e$  une valeur de l'attribut  $e$ .

**EXEMPLE 14** Dans le scénario de négociation considéré ici, un attribut  $e$  peut désigner un fournisseur et  $D_e$  est par exemple  $\{EDF, ENGIE, Butagaz, \dots, Enercoop\}$ , c'est-à-dire un ensemble de fournisseur d'énergie.

Chaque agent  $a_i$  choisit en fonction de ses besoins les attributs sur lesquels il souhaite négocier. Nous désignons par  $E_i \subseteq E$  le sous-ensemble d'attributs choisi par un agent  $a_i$ . Soit  $D_e^i \subseteq D_e$  l'ensemble des valeurs acceptables de l'agent  $a_i$  pour  $e \in E_i$ . Il s'agit alors de sa zone d'accords possibles. Chaque agent  $a_i$  affecte un poids  $w_e^i \in ]0, 1]$  à chaque attribut  $e \in E_i$ . Les poids des attributs dans  $E_i$  sont tels que  $\sum_{e \in E_i} w_e^i = 1$ . Le poids d'un attribut ne peut être égal à zero. Les agents ne révèlent pas les poids de leurs attributs lors de la négociation. Chaque agent possède une fonction d'utilité notée  $u_i$  pour évaluer les offres qu'il reçoit.

*Alliances et Clusters* : Soit  $S = \{S_1, \dots, S_Q\}$  l'ensemble des tours de négociation. Nous désignons par  $G_{s_q} = \{g_x\}$  l'ensemble des *clusters* formés durant un tour  $S_q$ . Un agent ne peut appartenir qu'à un seul cluster. Les agents dans chaque *cluster*  $g_x$  négocient sur le sous-ensemble d'attributs  $E_{g_x}$  représentant les attributs qu'ils ont en commun. L'ensemble des alliances formées durant la phase de négociation  $s_q$  est désigné par  $L_{s_q}$ .

Le mécanisme de négociation proposé est modélisé par le triplet  $C_s, N, F$  qui sont respectivement : le processus de partitionnement des agents, le processus de négociation des alliances, et le processus de combinaison des résultats finaux pour l'établissement de la solution finale de la négociation.  $C_s$  et  $F$  sont effectués par le système.  $N$  est le processus d'interaction entre les agents. Il s'effectue sans aucune unité de contrôle (sans médiateur).

$C_s$  : le partitionnement des agents s'effectue au début de chaque tour de négociation  $s_q$ , et concerne l'ensemble des alliances  $L_{s_{q-1}}$  formées pendant le tour précédent. Initialement, il s'agit de partitionner l'ensemble  $L_{s_0}$  correspondant à l'ensemble  $\mathcal{A}$  des agents dont chacun représente une alliance singleton.  $C_s$  fournit l'ensemble des *clusters*  $G_{s_q}$  dans lesquels les négociations vont avoir lieu. Chaque *cluster* est constitué d'un couple d'alliances.

$N$  : la négociation s'effectue dans chaque *cluster* appartenant à  $G_{s_q}$  durant le tour  $s_q$ . Les alliances de chaque *cluster* négocient pour trouver un accord et ensuite pour former une alliance plus grande.  $L_{s_q}$  est l'ensemble des alliances formées au cours de cette phase de négociation.

$F$  : la fusion consiste à assembler les solutions partielles supportées par les alliances formées au dernier tour  $s_q$  ( i.e., à la fin de la négociation) afin de déterminer la solution finale.  $F$  s'applique sur  $L_{s_q}$  et fournit la meilleure combinaison de solutions partielles.

$C_s$  et  $N$  s'effectuent de manière itérative et  $F$  s'effectue à la fin de la négociation. Autrement dit lorsqu'aucun nouveau groupe n'est formé.

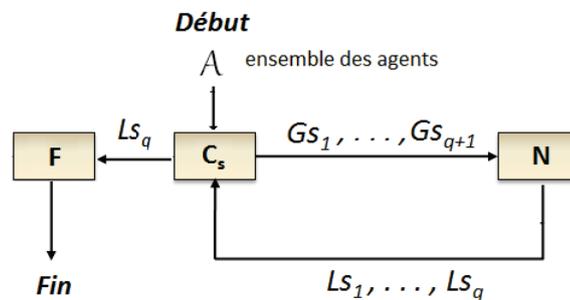


FIGURE 5.2: Les différentes phases du mécanisme de négociation proposé

## IV. Le mécanisme de négociation

Notre protocole de négociation permet aux agents de former des clusters dans lesquels ils négocient.

### 1 Formation de Clusters

Les clusters sont formés selon deux fonctions de similarité que nous avons proposées. Dans la première fonction, la similarité entre deux alliances est mesurée en fonction du nombre d'attributs qu'elles ont en commun et du nombre d'attributs qu'elles ne partagent pas. Dans la deuxième fonction, la similarité entre ces alliances est mesurée en fonction de leurs tailles, c'est-à-dire le nombre d'agents qu'elles détiennent et le nombre d'attributs sur lequel portera la proposition qu'elles supporteront lorsque leurs négociations débouchent sur un accord. Ces deux fonctions sont définies comme suit :

1 La fonction nommée  $sim_L$  s'appuyant sur l'index de Jaccard. Soient  $L_x, L_y$  deux alliances.  $E_{L_x}, E_{L_y}$  sont, respectivement, leurs ensembles d'attributs. La fonction de similarité entre les alliances est définie comme suit :

$$sim_L = J(E_{L_x}, E_{L_y}) = \frac{|E_{L_x} \cap E_{L_y}|}{|E_{L_x} \cup E_{L_y}|}$$

2 La fonction nommée  $sim_{L_+}$  intègre le fait que chaque alliance vise à obtenir le nombre maximal d'agents avec une proposition concernant le maximum d'attributs. Nous définissons une fonction  $gain$  qui donne un nombre réel représentant le gain obtenu par les alliances d'un cluster lorsque leur négociation aboutit à un accord, c'est-à-dire, lorsqu'ils deviennent une seule alliance. Cette fonction est définie comme suit :

$$gain(L_x, L_y) = \frac{|E_{L_x} \cup E_{L_y}|}{k} \times \frac{|L_x \cup L_y|}{n}$$

$n, k$  sont, respectivement, le nombre d'agents dans le système et le nombre total d'attributs. La fonction de similarité est définie comme suit :

$$sim_{L_+} = sim_L + gain$$

Les clusters sont formés selon les règles suivantes :

$R_1$  : seules les alliances dont leurs sous-ensembles d'attributs se chevauchent, sont couplées.

$R_2$  : deux alliances d'un cluster n'ayant pas trouvé d'accord à l'étape  $s_q$  ne seront pas dans le même cluster à l'étape suivante  $s_{q+1}$ .

$R_3$  : pendant un tour de négociation, lorsqu'une alliance n'est pas couplée avec une autre, elle ne participe pas à la négociation mais elle sera prise en compte dans le prochain partitionnement.

Ces règles permettent aux agents de mener des négociations plus concises et de faciliter la recherche d'accords. La formation de clusters s'effectue selon l'algorithme suivant :

La fonction *calculMatriceSimilarit* explore tous les clusters possibles formés par deux agents. Pour chaque couple d'agents, elle détermine une valeur représentant le degré de similarité entre les deux agents. Ces valeurs sont

---

**Algorithm 2** Formation initiale de clusters

---

**Require:**  $Lcp$  désigne l'ensemble des clusters possibles à former,  $G_{s_q}$  l'ensemble des clusters effectivement formés pendant le tour  $s_q$  de la négociation, et  $C$  variable de type cluster.

```
1:  $Lcp \leftarrow \text{calculMatriceSimilarit}()$ 
2: while  $Lcp$  n'est pas vide. do
3:    $C \leftarrow \text{RechercheClusterAvecValeurMax}(Lcp)$ 
4:    $g_x \leftarrow \text{CreateGroupe}(C)$ 
5:    $Lcp \leftarrow \text{SupprimerCluster}(Lcp, C)$ 
6:    $G_{s_q} \leftarrow \text{AjouterNewGroupe}(G_{s_q}, g_x)$ 
7: end while
```

---

calculées soit avec la fonction  $Sim_L$ , soit avec la fonction  $Sim_{L+}$ .

La fonction *RechercheClusterAvecValeurMax* recherche et renvoie le cluster qui a la plus grande valeur. Autrement dit, il retourne le cluster dont les agents sont plus similaires selon  $Sim_L$  ou  $Sim_{L+}$ .

**EXEMPLE 15** Considérons les agents représentés dans Figure 5.1. Les tables 5.2 et 5.3 représentent respectivement les matrices de similarité pour les agents  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$  selon les fonctions respectives  $Sim_L$  et  $Sim_{L+}$ .

Agents	liste des attributs choisis
$a_1$	$e_1, e_2, e_3$
$a_2$	$e_1, e_4$
$a_3$	$e_3, e_5$
$a_4$	$e_2, e_4, e_5$
$a_5$	$e_3, e_4, e_5$
$a_6$	$e_2, e_5$

TABLE 5.1: Les sous-ensembles d'attributs choisis par chaque agent

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
$a_1$		0,25	0,25	0,2	0,2	0,25
$a_2$			0	0,25	0,25	0
$a_3$				0,25	0,67	0,33
$a_4$					0,5	0,67
$a_5$						0,25
$a_6$						

TABLE 5.2: Matrice de similarité selon la fonction  $sim_L$

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
$a_1$		0,52	0,52	0,53	0,53	0,52
$a_2$			0,27	0,52	0,52	0,27
$a_3$				0,52	0,87	0,53
$a_4$					0,77	0,87
$a_5$						0,52
$a_6$						

TABLE 5.3: Matrice de similarité selon la fonction  $sim_{L+}$

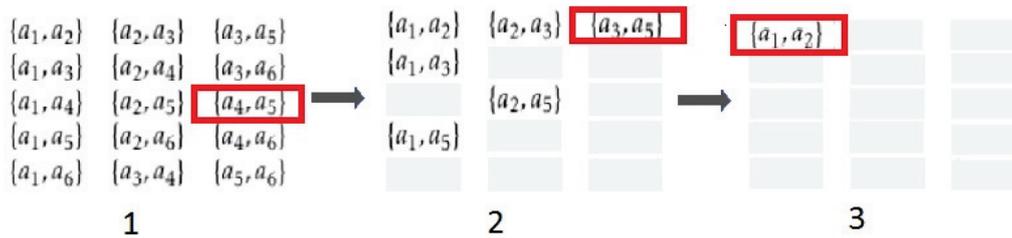


FIGURE 5.3: Formation de Clusters. Cette figure montre les différentes étapes de la formation initiale des clusters en utilisant par exemple la fonction  $Sim_L$ . La formation de clusters s'effectue en plusieurs itérations. Dans la première itération, les agents  $a_4$  et  $a_6$  forment le premier cluster  $g_1$  car leur degré de similarité est le plus élevé comparé aux autres couples d'agents (cf. figure 5.2). Ensuite, tous les autres clusters dans lesquels figurent  $a_4$  et/ou  $a_6$  sont supprimés. Dans la deuxième itération, les agents  $a_3$  et  $a_5$  forment le deuxième cluster  $g_2$  car leur degré de similarité est le plus élevé comparé aux autres couples d'agents restantes. Tous les autres clusters dans lesquels figurent  $a_3$  et/ou  $a_5$  sont supprimés. Dans la troisième itération, les agents  $a_1$  et  $a_2$  forment le troisième cluster  $g_3$ .

## 2 Les types d'offres

Les offres que soumettent les agents dans un cluster portent sur les attributs qu'ils négocient. Lorsque dans un cluster les agents négocient sur un attribut, il peut exister d'autres agents en dehors de ce cluster qui s'intéressent à cet attribut. Les agents de ce cluster rencontreront plus tard ces agents pour négocier sur cet attribut. Ainsi, pour faciliter la recherche d'accords, le mécanisme que nous proposons permet aux agents de soumettre des offres flexibles. Cela signifie dans notre contexte que l'agent proposera une plage de valeurs pour un attribut.

Cependant, nous distinguons deux façons de proposer une offre pour un attribut :

l'agent donne soit une valeur fixe soit une plage de valeurs à l'attribut. Pour savoir si une valeur fixe ou une plage de valeurs doivent être négociées, l'agent mesure la portée de l'attribut.

**Définition 15** *Portée d'un attribut  $e$  :*

*soient  $n_e$  le nombre d'agents qui s'intéressent à l'attribut  $e$  et  $n_e^c$  le nombre d'agents qui négocient sur  $e$  dans un cluster donné. La portée de l'attribut  $e$  notée  $\rho_e$  est la différence entre  $n_e$  et  $n_e^c$ . Formellement,  $\rho_e = n_e - n_e^c$ .*

Pour notre contexte, la portée d'un attribut signifie le fait que l'attribut est négocié dans un cluster contenant tous les agents qui s'intéressent à cet attribut ou uniquement une partie de ces agents.

**EXEMPLE 16** *La figure 5.1 présente trois clusters formés respectivement des agents  $\{a_1, a_2\}$ ,  $\{a_3, a_5\}$ ,  $\{a_4, a_6\}$  pendant la phase  $S_1$ . Les agents dans ces clusters négocient respectivement sur les attributs  $\{e_1\}$ ,  $\{e_3, e_5\}$ ,  $\{e_2, e_5\}$ . La portée  $\rho_{e_1}$  est égale à zero car il n'existe aucun agent en dehors de ce cluster qui s'intéresse à  $e_1$ . Les portées  $\rho_{e_2}$ ,  $\rho_{e_3}$  et  $\rho_{e_5}$  sont différentes de zero car il existe d'autres agents en dehors de ces clusters qui s'intéressent à ces attributs.*

Lorsqu'un attribut est négocié dans un cluster et que sa portée est différente de zero, les agents appartenant à ce cluster doivent négocier une solution partielle pour cet attribut. C'est-à-dire, ils doivent s'accorder sur une plage de valeurs pour cet attribut. Chaque agent qui soumet une offre, propose pour chaque attribut concerné un sous-ensemble de valeurs. Cela a pour but de rendre flexible la négociation entre les alliances et de faciliter la recherche d'accords. Pour illustration, reprenons l'exemple 16. Les agents  $a_3$  et  $a_5$  négocient pour trouver des solutions partielles concernant les attributs  $e_3$  et  $e_5$ . De même que les agents  $a_4$  et  $a_6$  négocient pour trouver des solutions partielles concernant les attributs  $e_2$  et  $e_5$ .

Lorsqu'un attribut est négocié dans un cluster et que sa portée est égale à zero, les agents appartenant à ce cluster doivent négocier pour trouver une solution finale concernant cet attribut. En effet, ce dernier ne sera plus négocié aux prochains tours de la négociation. C'est le cas de l'attribut  $e_1$  négocié par les agents  $\{a_1, a_2\}$ .

Dans un cluster, l'ensemble des attributs  $E_{g_x}$  sur lequel les agents négocient est scindé en deux sous-ensembles  $E_{g_x}^f, E_{g_x}^d$  désignant respectivement les attributs sur lesquels des solutions finales doivent être négociées et les attributs sur lesquels des solutions partielles doivent être négociées. Nous définissons deux types d'offres : *offre fixe* et *offre partielle*.

- $\mathcal{O}^f$  désigne le type *offre fixe*. Il s'agit de proposer une seule valeur à chaque attribut dans  $E_{g_x}^f$ . Formellement,

$$\mathcal{O}^f = \overline{E_{g_x}^f} = \{\varepsilon_e | e \in E_{g_x}^f, \varepsilon_e \in D_e\}$$

- $\mathcal{O}^d$  désigne le type *offre partielle*. Il s'agit de proposer une plage de valeurs à chaque attribut dans  $E_{g_x}^d$ . Formellement,

$$\mathcal{O}^d = \overline{E_{g_x}^d} = \{D'_e | D'_e \subseteq D_e, e \in E_{g_x}^d\}$$

Une offre soumise par un agent  $a_i$  dans son *cluster*  $g_x$  est représentée comme suit :

$$O_{i \rightarrow g_x} = \mathcal{O}_i^f \cup \mathcal{O}_i^d$$

**EXEMPLE 17** En nous référant toujours à la figure 5.1, nous avons au tour  $S_1$  :

$$E_{g_1}^f = \{\emptyset\}, E_{g_1}^d = \{e_2, e_5\} \text{ avec } g_1 = \{a_4, a_6\}$$

$$E_{g_2}^f = \{\emptyset\}, E_{g_2}^d = \{e_3, e_5\} \text{ avec } g_2 = \{a_3, a_5\}$$

$$E_{g_3}^f = \{e_1\}, E_{g_3}^d = \{\emptyset\}, \text{ avec } g_3 = \{a_1, a_2\}$$

La décomposition des attributs  $E_{g_x}$  en sous-ensembles  $E_{g_x}^f$  et  $E_{g_x}^d$  peut être faite par n'importe quel agent dans le *cluster*. Nous rappelons que les choix des agents sur les attributs qu'ils vont négocier sont des informations publiques. Chaque agent connaît les sous-ensembles d'attributs choisis par les autres agents et il détermine pour chaque attribut qui l'intéresse l'ensemble des agents avec lesquels il le partage. Lorsqu'un *cluster* est formé, chaque agent dans le *cluster* connaît l'ensemble des agents membres de son alliance et celui de l'alliance opposante. Pour savoir si un attribut  $e \in E_{g_x}$  appartient à  $E_{g_x}^f$  ou à  $E_{g_x}^d$ , il compare l'ensemble des agents dans le *cluster* et l'ensemble des agents avec lesquels il partage cet attribut. Si tous les agents avec lesquels il partage cet attribut sont présents dans le *cluster*, alors il n'existe aucun agent en dehors de ce *cluster* susceptible de s'intéresser à cet attribut. Sinon il existe au moins un agent qui n'est pas dans le *cluster* et qui s'intéresse à cet attribut.

### 3 Négociation dans un *cluster*

Initialement, chaque agent  $a_i$  détermine pour chaque attribut  $e \in E_i$ , une tactique de négociation lui permettant de déterminer à tout moment de la négociation la

valeur ou la plage de valeurs à proposer. La négociation se déroule simultanément dans chaque groupe  $g_x$  (*cluster*) et se focalise sur les sous-ensembles  $E_{g_x}$ . Les attributs dans  $E$  sont négociés progressivement. Pendant chaque phase de négociation, un sous-ensemble d'attributs de  $E$  sont négociés dans les différents clusters formés.

**EXEMPLE 18** *Comme illustré par la figure 5.1, au tour :*

$s_1$ , la négociation se focalise sur  $\{e_1, e_2, e_3, e_5\}$

$S_2$ , la négociation se focalise sur  $\{e_3, e_4\}$

$S_3$ , la négociation se focalise sur  $\{e_2, e_4, e_5\}$

$S_4$ , la négociation se focalise sur  $\{e_2, e_5\}$

$S_5$ , la négociation se focalise sur  $\{e_2, e_4, e_5\}$

Un attribut dont une valeur finale a été trouvée dans les tours précédents ne sera plus négocié dans les prochains tours. Lors d'une phase de négociation, un attribut est soit négocié dans les tours précédents, soit il n'a jamais été négocié. Pour modéliser ces différentes situations, nous assignons des états aux attributs. Chaque attribut dans  $E$  est soit à l'état 1, soit à l'état 0. L'état 0 indique que l'attribut n'a jamais été négocié et l'état 1 indique le contraire. Un attribut à l'état 0 change d'état dès qu'il est discuté dans un ou plusieurs *clusters*.

Nous décomposons l'ensemble des attributs  $E_{g_x}$  sur lesquels porte la négociation dans un cluster  $g_x$  comme suit :

$M_{11} \subseteq E_{g_x}$  l'ensemble des attributs déjà négociés par les deux alliances de  $g_x$ ,

$M_{00} \subseteq E_{g_x}$  l'ensemble des attributs négociés par aucune alliance dans  $g_x$ ,

$M_{10} \subseteq E_{g_x}$  l'ensemble des attributs négociés par l'une des alliances dans  $g_x$ .

### Soumission d'offres par une alliance

Lorsqu'une alliance soumet une offre, elle propose pour chaque attribut  $e \in E_{g_x}^f$  une valeur et pour chaque attribut  $e \in E_{g_x}^d$  une plage de valeurs. Nous identifions ci-dessous les situations qui peuvent se présenter lors d'une négociation entre deux alliances dans un cluster :

1. Si  $e \in E_{g_x}^f$  et  $e \in M_{11}$  alors chaque alliance du *cluster* qui fait une offre, propose une valeur en fonction de la tactique de négociation commune définie par les agents appartenant à cette alliance pour cet attribut.

2. Si  $e \in E_{g_x}^d$  et  $e \in M_{11}$  alors chaque alliance du *cluster* qui fait une offre, propose une plage de valeurs selon la tactique de négociation commune définie par les agents appartenant à cette alliance pour cet attribut.

3. Si  $e \in E_{g_x}^f$  et  $e \in M_{10}$  alors l'une des alliances du *cluster* qui fait une offre et ayant déjà établi une solution partielle pour cet attribut, propose une valeur en fonction de la tactique de négociation définie par les agents de cette alliance. Pour l'alliance n'ayant pas encore négocié cet attribut, il existe au plus un seul agent de cette alliance qui serait intéressé par cet attribut. Ce dernier propose la valeur à soumettre en fonction de sa tactique de négociation.

En fait, les agents forment une alliance lorsqu'ils se mettent d'accord sur tous les attributs qu'ils ont en commun. Donc, il n'est pas possible de trouver un attribut à l'état 0 (non négocié) qui intéresse plus d'un seul agent dans cette alliance. Alors  $e$  ne peut intéresser qu'un seul agent de l'alliance puisque le partitionnement en *clusters* se fait par paires.

4. Si  $e \in E_{g_x}^d$  et  $e \in M_{10}$  alors l'une des alliances du *cluster* faisant une offre et ayant déjà défini dans les tours précédents une solution partielle pour cet attribut proposera une plage de valeurs selon la tactique de négociation commune définie par les agents appartenant à cette alliance. Pour l'alliance n'ayant pas encore négocié pour cet attribut, l'agent concerné proposera une plage de valeurs selon sa tactique de négociation.

5. Si  $e \in E_{g_x}^f$  et  $e \in M_{00}$  alors aucune des deux alliances du *cluster* n'a établi durant les tours précédents, une solution pour cet attribut. Donc l'agent concerné de chacune des alliances proposera une valeur pour cet attribut selon sa tactique de négociation.

6. Si  $e \in E_{g_x}^d$  et  $e \in M_{00}$  alors aucune des alliances du *cluster* n'a défini durant les tours précédents, une solution pour cet attribut. Donc l'agent concerné de chacune des alliances proposera une plage de valeurs pour cet attribut selon sa tactique de négociation.

**EXEMPLE 19** *Considérons l'exemple du scénario de négociation présenté dans la figure 5.1. Soit  $\{a_1, a_2\}$  et  $\{a_3, a_5\}$  les sous-ensembles d'agents formant deux alliances à l'issue de la négociation menée au premier tour  $S_1$ . Ces alliances sont regroupées dans un *cluster* au tour  $s_2$  pour négocier sur le sous-ensemble d'attributs  $\{e_3, e_4\}$ . Nous avons alors les sous-ensembles d'attributs  $M_{11} = \emptyset, M_{00} = \{e_4\}, M_{10} = \{e_3\}$  suivant une décomposition des attributs en fonction de leurs états. Les alliances doivent s'accorder*

sur une valeur unique (valeur fixe) pour  $e_3$  parce qu'il n'existe aucun autre agent en dehors du cluster qui s'intéresse à  $e_3$  et sur une plage de valeurs pour  $e_4$  parce qu'il existe un autre agent dont  $a_4$  qui ne se trouve pas dans le cluster et qui s'intéresse à l'attribut  $e_4$ .

Lorsque l'alliance constituée des agents  $\{a_1, a_2\}$  fait une offre, elle affecte des valeurs aux attributs  $e_3, e_4$ . L'attribut  $e_3 \in E_1$ , alors l'agent  $a_1$  propose une valeur  $\varepsilon_{e_3}$  pour  $e_3$ . La valeur  $\varepsilon_{e_3}$  est déterminée par  $a_1$  en fonction de sa tactique de négociation pour  $e_3$ . Une plage de valeurs  $D'_{e_4}$  pour  $e_4$  est déterminée par  $a_2$  en fonction de sa tactique de négociation.

Lorsque l'alliance constituée des agents  $\{a_3, a_5\}$  fait une offre, elle affecte aussi des valeurs aux attributs  $e_3, e_4$ . L'attribut  $e_3$  a déjà été négocié au précédent tour par les agents de cette alliance. La valeur à offrir est déterminée selon la tactique de négociation définie par tous les agents de cette alliance. La plage de valeurs pour  $e_4$  est proposée par  $a_5$  selon sa tactique de négociation.

### Évaluation d'une offre

Chaque agent  $a_i$  accorde à chaque valeur d'un attribut  $e \in E_i$  un score  $v_e^i(\varepsilon_e)$  selon ses critères d'évaluation. Par exemple, dans le scénario de négociation pour l'achat d'énergie groupé, un agent peut évaluer un fournisseur selon sa fiabilité, sa fourniture d'énergie verte, et la qualité de son service client.

La fonction d'utilité  $u_i$  d'un agent est définie comme suit :

$$u_i(O^f) = \sum_{e \in E_{gx}^f \cap E_i} w_e^i \cdot v_e^i(\varepsilon_e) \quad (5.1)$$

$$u_i(O^d) = \sum_{e \in E_{gx}^d \cap E_i} w_e^i \cdot v_e^i(D'_e), \quad \text{avec} \quad v_e^i(D'_e) = \frac{\sum_{\varepsilon_e \in D'_e} v_e^i(\varepsilon_e)}{|D'_e|} \quad (5.2)$$

$$u_i(O_{j \rightarrow gx}) = u_i(O^f) + u_i(O^d) \quad (5.3)$$

L'équation 5.3 donne l'utilité d'une offre soumise par un agent  $a_j$  à  $a_i$ .

Une alliance  $l_k$  accepte une offre  $O_{l_r \rightarrow gx}^t$  faite par une autre alliance  $l_r$  à l'instant  $t$ , lorsque chaque agent de cette alliance l'accepte.

Un agent accepte une offre si son utilité est supérieure à celle de son alliance à l'instant  $t+1$ . Formellement,  $u(O_{l_k \rightarrow gx}^{t+1}) \leq u(O_{l_r \rightarrow gx}^t)$ . Dans le cas contraire, l'offre

est refusée. Les alliances interagissent entre elles en utilisant les actes du langage formalisés ci-dessus :

$Propose(l_r, g_x, O_{l_r \mapsto g_x})$  : l'alliance  $l_r$  dans le *cluster*  $g_x$  soumet une offre  $O_{l_r \mapsto g_x}$  à une alliance  $l_k \in g_x$ .

$Accept(l_k, g_x, O_{l_r \mapsto g_x})$  : l'alliance  $l_k$  dans le *cluster*  $g_x$  envoie un message d'acceptation pour l'offre  $O_{l_r \mapsto g_x}$ .

$Refuse(l_k, g_x, O_{l_r \mapsto g_x})$  : alliance  $l_k$  dans le *cluster*  $g_x$  envoie un message de refus pour l'offre  $O_{l_r \mapsto g_x}$ .

Lorsque les alliances négociant dans un cluster s'accordent sur une offre, elles se joignent et deviennent une seule alliance. Pour chaque attribut  $e \in E_{g_x}^d$ , elles définissent, ensemble une tactique de négociation commune pour déterminer aux prochains tours les valeurs qu'elles proposeront pour cet attribut. Tout attribut  $e \in E_{g_x}^f$  dont une solution finale a été négociée, ne sera plus négocié aux prochains tours.

## V. Tactiques de négociation

Dans notre protocole de négociation, chaque agent  $a_i \in \mathcal{A}$  définit pour chaque attribut  $e \in E_i$  un intervalle de valeurs de score désigné par  $[min_{v_e^i}, max_{v_e^i}]$  représentant sa *zone d'accords possibles*. Cela signifie que l'agent  $a_i$  pourra proposer ou accepter, au cours de la négociation, toute valeur  $\varepsilon_e$  de l'attribut  $e$  dont le score  $v_e^i(\varepsilon_e) \in [min_{v_e^i}, max_{v_e^i}]$ . Chaque agent  $a_i$  a pour objectif que la solution finale pour chaque attribut maximise son utilité, c'est-à-dire que la valeur de chaque attribut corresponde à un score égale à  $max_{v_e^i}$ . Cependant, l'agent commence toujours sa négociation en proposant des offres qui répondent à ses aspirations. Mais à un certain moment de la négociation il est appelé à faire des concessions. Cela consiste à réduire ses aspirations et à proposer de nouvelles offres. Il s'agit de revoir à la baisse l'utilité espérée pour chaque attribut, autrement dit la valeur de score souhaitée. La tactique de négociation que l'agent définit pour réduire sa valeur de score espérée pour un attribut dépend du poids de cet attribut.

**Définition 16** Une tactique de négociation d'un agent  $a_i$  pour un attribut  $e$  est une fonction  $V_e^i$  positive et décroissante.  $V_e^i$  évolue en fonction du temps et prend ses valeurs dans l'intervalle  $[min_{v_e^i}, max_{v_e^i}]$ .

$$V_e^i : [0, t_{max}^i] \mapsto [min_{v_e^i}, max_{v_e^i}]$$

avec  $t_{max}^i < d_l$  le temps pendant lequel l'agent décide de proposer sa valeur de réserve, c'est-à-dire, négocier avec une valeur de score espérée égale à  $\min_{v_e^i}$ .

$V_e^i$  permet à l'agent  $a_i$  de déterminer à tout moment de la négociation la valeur de score souhaitée et l'ensemble des valeurs acceptables de l'attribut qu'il peut proposer ou accepter.

**EXEMPLE 20** *Considérons l'exemple d'achat groupé d'énergie. Soit  $a_i$  un agent qui négocie sur l'attribut  $e$  correspondant au fournisseur d'énergie. Soit  $D_e = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5\}$  l'ensemble des fournisseurs d'énergie, et  $(0.9, 0.7, 0.8, 0.3, 0.5)$  leurs valeurs de score respectives, selon leur fiabilité par exemple. L'agent  $a_i$  a comme aspiration un fournisseur dont la fiabilité est dans l'intervalle  $[\min_{v_e^i} = 0.5, \max_{v_e^i} = 0.9]$ . L'ensemble de ses valeurs acceptables est  $D_e^i = \{F_1, F_2, F_3, F_5\}$ . Initialement  $a_i$  proposera ou acceptera  $F_1$  et sa valeur de réserve est la dernière valeur qu'il proposera, c'est-à-dire  $F_5$ .*

Les travaux dans [31] présentent différentes tactiques de négociation définies en fonction de plusieurs critères tels que : le temps, les ressources et l'imitation<sup>1</sup>. Dans notre mécanisme, nous nous intéressons aux tactiques de négociation dépendant du temps.

$V_e^i$  détermine, à chaque moment  $t \in [0, t_{max}^i]$ , la valeur de score qu'un agent  $a_i$  voudra négocier pour l'attribut  $e$ . Elle est définie comme suit :

$$V_e^i(t) = \min_{v_e^i} + (1 - \alpha_e^i(t)) \times [\max_{v_e^i} - \min_{v_e^i}].$$

Comme décrit dans [31], un ensemble de fonctions dépendant du temps peut être défini en faisant varier les stratégies pour calculer  $\alpha_e^i(t)$ . La fonction  $\alpha_e^i$  est telle que

$$0 \leq \alpha_e(t)^i \leq 1, \quad \alpha_e^i(0) = k_e, \quad \alpha_e^i(t_{max}) = 1$$

avec  $0 \leq t \leq t_{max}^i$ ,  $t_{max}^i < d_l$ .  $d_l$  est la date limite de négociation.

Comme le montre Figure 6.10 extraite de [31], la fonction  $\alpha_e^i$  peut être polynomiale (equation 5.4) ou exponentielle (equation 5.5).

$$\text{Polynomiale : } \alpha_e^i(t) = k_e^i + (1 - k_e^i) \left( \frac{\min(t, t_{max}^i)}{t_{max}^i} \right)^{\frac{1}{\beta_e^i}} \quad (5.4)$$

$$\text{Exponentielle : } \alpha_e^i(t) = e^{(1 - \frac{\min(t, t_{max}^i)}{t_{max}^i})^{\beta_e^i} \ln k_e^i} \quad (5.5)$$

Le paramètre  $\beta_e^i$  détermine le degré de convexité de  $\alpha_e^i$  (voir Figure 6.10). La manière dont l'agent  $a_i$  va concéder pour l'attribut  $e$  va dépendre de la valeur de

1. L'agent décide de l'offre à proposer en fonction des offres qu'il reçoit

$\beta_e^i$ .

Dans notre mécanisme, il s'agit alors pour chaque agent  $a_i$  de déterminer pour chaque attribut sur lequel il va négocier, la valeur  $\beta_e^i$  en fonction du poids  $w_e^i$  de cet attribut (détaillé dans la section suivante).

**Propriété 17** Lorsque  $k_e^i = 1$ , la première valeur de score qu'un agent  $a_i$  négociera pour  $e$  à l'instant  $t=0$  est  $V_e(0) = \max_{v_e}$  car  $\alpha_e(0) = k_e^i = 1$  qu'elle soit exponentielle ou polynomiale.

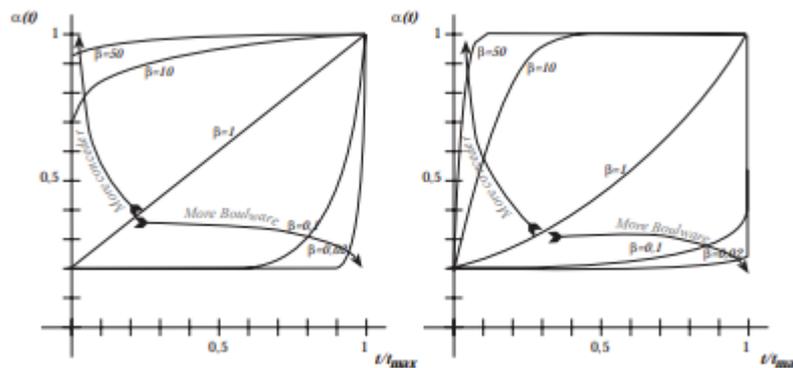


FIGURE 5.4: [31] Ces fonctions sont significativement différentes selon la valeur de  $\beta$

Chaque agent  $a_i$  définit pour chaque  $e \in E_i$  une valeur  $\beta_e^i$  en fonction du poids  $w_e^i$ . Il existe trois familles de tactiques [31] :

- la tactique de Boulware correspond à  $\beta_e^i < 1$ . Lorsque la valeur de  $\beta_e^i$  est inférieure à 1, l'agent ne concède pas rapidement, il conserve son offre initiale jusqu'à ce que le temps imparti à la négociation soit presque atteint.
- la tactique de concession correspond à  $\beta_e^i > 1$ . Lorsque la valeur du paramètre  $\beta_e^i$  est supérieure à 1, l'agent concède plus rapidement comparé à la tactique de Boulware.
- la tactique linéaire correspond à  $\beta_e^i = 1$ . Lorsque la valeur de  $\beta_e^i$  est égal à 1, l'agent concède de façon linéaire.

Nous considérons que chaque paramètre  $\beta_e^i$  prend une valeur dans l'intervalle  $[\beta_{min}, \beta_{max}]$ .

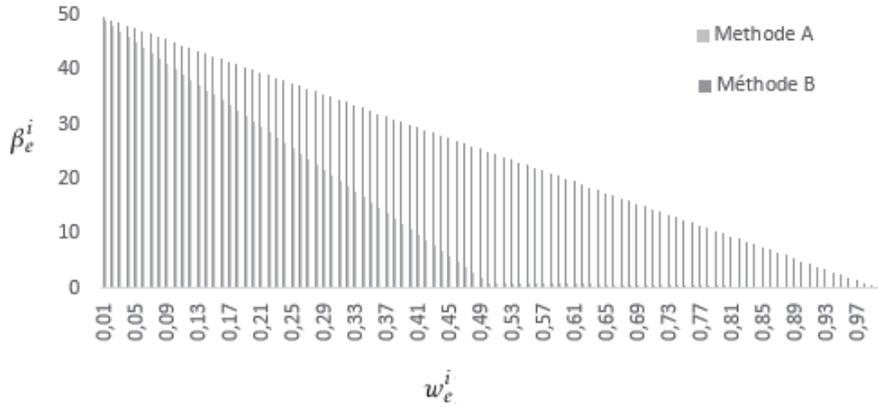


FIGURE 5.5: l Comparaison des deux méthodes A et B

Nous proposons deux méthodes *A* et *B* pour déterminer  $\beta_e^i$ . Nous supposons qu'un agent concèdera moins rapidement pour les attributs ayant un poids plus élevé et plus rapidement pour les attributs ayant un poids plus petit.

$$A: \quad \beta_e^i = \beta_{min} + (\beta_{max} - \beta_{min}) \times (1 - w_e^i), \quad 0 < w_e^i \leq 1$$

$$B: \quad \beta_e^i = \begin{cases} 1 + (\beta_{max} - 1) \times (1 - 2w_e^i), & 0 < w_e^i \leq 0.5 \\ 1 + (1 - \beta_{min}) \times (1 - 2w_e^i), & 0.5 \leq w_e^i \leq 1 \end{cases}$$

La différence entre les deux méthodes *A* et *B* est que dans *B*, les agents affecteront aux attributs dont le poids est compris dans l'intervalle  $[0, 0.5]$  des paramètres de  $\beta > 1$ , aux attributs dont le poids est compris dans l'intervalle  $[0.5, 1]$  des paramètres de  $\beta < 1$ . Ces deux méthodes et leurs impacts sur le résultat de la négociation ont été analysés empiriquement (voir chapitre 6).

Les courbes de la figure 5.5 montrent les différentes valeurs que peut prendre  $\beta_e^i$  selon son poids  $w_e^i$ .

La fonction  $V_e^i$  permet à chaque agent  $a_i$  de déterminer une valeur de score espérée et par conséquent la valeur de l'attribut  $e$  à offrir en fonction du temps. Pour déterminer une plage de valeurs à proposer, l'agent  $a_i$  définit un autre paramètre  $\beta_e^i$  calculé selon deux méthodes :

$$A': \quad \beta_e^i = \beta_e^i + k(\beta_{max} - \beta_e^i), \quad \beta_{min} \leq \beta_e^i \leq \beta_{max}$$

$$B': \quad \beta_e^i = \begin{cases} \beta_e^i + k(1 - \beta_e^i), & \beta_e^i \leq 1 \\ \beta_e^i + k(\beta_{max} - \beta_e^i), & \beta_e^i \geq 1 \end{cases}$$

$k^i$  est une constante dont la valeur est comprise dans  $]0,1]$  et spécifique à chaque agent.

$V_e^i(t) = \min_{v_e^i} + (1 - \alpha_e^i(t)) \times [\max_{v_e^i} - \min_{v_e^i}]$  détermine la valeur de score minimal espérée à l'instant  $t$ . La plage de données que  $a_i$  proposera pour l'attribut  $e$  correspondra à l'ensemble des valeurs de  $e$  dont les valeurs de score sont comprises entre  $V_e^i(t)$  et  $V_e^i(t)$ .  $\alpha_e^i(t)$  est calculée avec  $\beta_e^i$ .

Le sous-ensemble de valeurs que l'agent  $a_i$  proposera à l'instant  $t$  correspond à l'ensemble des valeurs  $\epsilon_e$  de l'attribut  $e$  telles que  $V_e^i(t) \leq v_e(\epsilon_e) \leq V_e^i(t)$ . Lorsqu'une nouvelle alliance se forme les agents membres définissent ensemble pour chaque attribut à négocier pendant les prochains tours, une tactique de négociation commune. Les agents formant l'alliance déterminent un nouveau paramètre  $\beta_e^L$  calculé en fonction du poids moyen de l'attribut  $e$ .

$$\beta_e^L = \frac{\sum_{a_i \in L} w_e^i}{2}$$

Si une alliance soumet une offre fixe, elle utilise le paramètre  $\beta_e^L$  et si elle soumet une offre partielle, elle utilise les paramètres  $\beta_e^L$  et  $\beta_e'^L$  calculé avec les méthodes  $A'$  ou  $B'$ .

## VI. Évaluation de la solution de négociation

À la fin de la négociation plusieurs alliances peuvent se former. Les propositions défendues par les alliances peuvent avoir en commun des attributs ou non. Elles peuvent être complètes ou partielles. Nous rappelons que la solution de négociation doit être une proposition complète et supportée par une alliance formée par la majorité des agents.

**Propriété 18** *À l'issue de la négociation, lorsqu'il existe une alliance formée par la majorité des agents et supportant une proposition complète, c'est-à-dire portant sur tous les attributs en jeu, alors cette proposition est la solution de la négociation et elle est unique.*

La preuve de la propriété 18 est triviale car un agent ne peut appartenir qu'à une seule alliance. S'il existe une alliance formée par la majorité des agents, toute autre alliance est formée avec un nombre d'agents en-dessous du seuil de majorité.

Lorsqu'il n'existe aucune alliance majoritaire, la phase de fusion  $F$  est effectuée. Les propositions n'ayant aucun attribut en commun sont combinées pour construire

une proposition complète. La combinaison des propositions entraîne la fusion des alliances les supportant. À l'issue de cette combinaison, s'il existe une alliance formée par la majorité avec une proposition complète, alors cette proposition devient une solution acceptable et si elle est unique elle devient la solution finale de la négociation.

Il peut exister plusieurs alternatives pour fusionner des alliances. Le processus de fusion proposé vise à déterminer les alliances à fusionner afin d'obtenir une solution efficace et équitable. Une solution est acceptable lorsqu'elle est supportée par plus de 50% des agents (c'est-à-dire une majorité) et lorsqu'elle concerne tous les attributs en jeu. Dans la figure 5.1, la solution supportée par  $\{a_1, a_2, a_3, a_5, a_6\}$  est acceptable. Le processus de fusion peut générer plusieurs solutions acceptables qui sont comparées selon le critère de satisfaction sociale, présenté dans le chapitre 3 afin de déterminer une solution efficace unique.

## VII. Analyse de la complexité

Pour étudier la complexité du mécanisme de négociation que nous proposons, nous évaluons théoriquement le nombre de clusters formés durant un processus de négociation. Chaque attribut en jeu peut intéresser un ou plusieurs agents. Notons  $n_e$  le nombre d'agents qui s'intéressent à l'attribut  $e$  avec  $1 \leq n_e \leq n$ . Au cours de la négociation, chacun de ces agents doit échanger avec tous les autres avec lesquels il partage cet attribut. Ces échanges sont effectués de manière progressive. Ainsi, les négociations sur cet attribut peuvent s'effectuer dans plusieurs clusters et pendant plusieurs tours de négociation. Une solution finale pour cet attribut doit être établie lorsque tous les  $n_e$  agents se retrouvent dans un même cluster.

Nous évaluons d'abord le nombre de clusters dans lesquels l'attribut  $e$  sera négocié. Ensuite, nous déterminons le nombre total de clusters que les agents vont former pour négocier tous les attributs en jeu. Pour mener cette évaluation, nous considérons deux situations :

- lorsque la négociation se passe dans le meilleur des cas.
- lorsque la négociation se passe dans le pire des cas.

### 1 Négociation dans le meilleur des cas

La meilleure situation est lorsqu'un accord est trouvé à chaque fois que les agents négocient dans un cluster. Ces agents forment ensuite une seule alliance (voir Figure 5.6).

Le nombre total  $m$  de clusters qui seront formés est la somme des termes d'une suite géométrique de raison  $\frac{1}{2}$  et de premier terme  $u_1 = \lfloor \frac{1}{2} \times n_e \rfloor$ .

Le nombre de clusters formés du premier tour  $S_1$  est :

$$U_{S_1} = \lfloor \frac{1}{2} \times n_e \rfloor$$

Le nombre de clusters formés au tour  $S_q$  est :

$$U_{S_q} = \lfloor \frac{1}{2^q} \times n_e \rfloor \quad \text{si} \quad \frac{1}{2^q} \times n_e - \lfloor \frac{1}{2^q} \times n_e \rfloor \leq 0.5 \quad \text{avec} \quad 1 \leq q \leq Q$$

$$U_{S_q} = \lceil \frac{1}{2^q} \times n_e \rceil \quad \text{si} \quad \frac{1}{2^q} \times n_e - \lfloor \frac{1}{2^q} \times n_e \rfloor > 0.5 \quad \text{avec} \quad 1 \leq q \leq Q$$

$Q$  est le nombre de tours de négociation.  $U_{S_q}$  est le nombre de clusters formés pendant le tour  $S_q$ . L'expression du terme  $U_{S_q}$  a été définie pour pouvoir prendre en compte le cas où le nombre d'alliances à répartir en clusters est impair.

*Le nombre total de clusters à former durant tout le processus de la négociation est la somme des  $Q$  premiers termes de la suite géométrique  $U_{S_q}$ .  $Q$  est tel que  $U_{S_{Q+1}} = 0$ .*

Le nombre total de clusters formés est :

$$m = \sum_{q=1}^Q U_{S_q}$$

## 2 Négociation dans le pire des cas

La pire situation est lorsqu'aucun accord n'est trouvé à chaque fois que les agents négocient dans un cluster. Dans ce cas, les alliances de ce cluster ne seront pas fusionnées. Chacune sera éventuellement couplée avec une autre alliance lors du prochain tour de négociation (voir Figure 5.6).

*Dans le pire des cas, le nombre de clusters formés est le cardinal de l'ensemble des parties de 2 agents parmi  $n_e$  agents qu'on peut former. Ce nombre est le coefficient binomial :*

$$m = \binom{n_e}{2} = \frac{n_e!}{2!(n_e - 2)!}$$

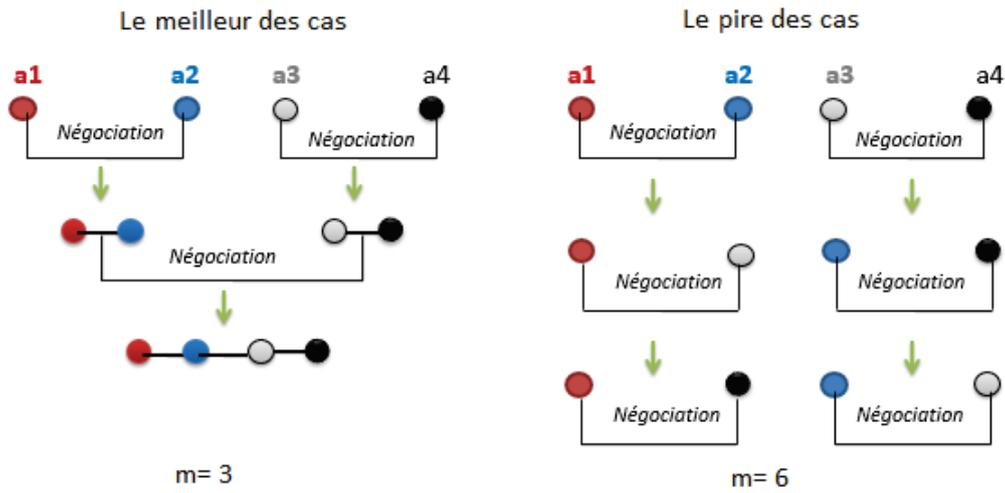


FIGURE 5.6: Nombre de clusters dans lesquels un attribut  $e$  est négocié lorsque  $n_e = 4$ .

**EXEMPLE 21** Dans la figure 5.6, nous représentons l'ensemble des clusters formés par les  $n_e$  agents dans le meilleur des cas et dans le pire des cas. Chaque agent  $a$  négocie avec tous les autres agents avec lesquels il partage l'attribut  $e$ .

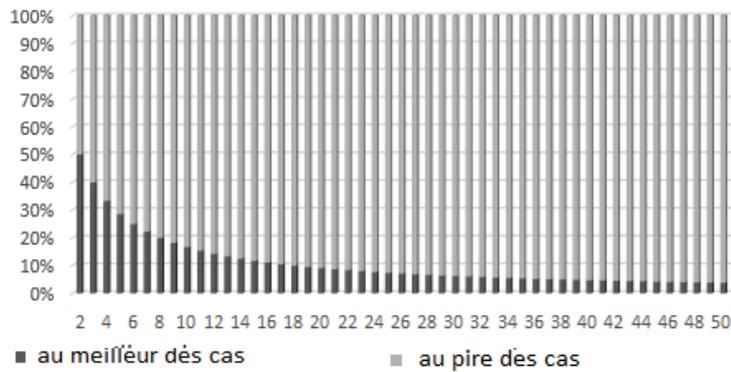


FIGURE 5.7: Différence entre le nombre de clusters formés dans le meilleur des cas et dans le pire des cas.

La figure 5.7 montre la différence entre les nombre de clusters formés dans le pire et dans le meilleur des cas en fonction du nombre d'agents. Ces différence sont exprimées en pourcentage. Par exemple, lorsque le nombre d'agents est égal à 2, les nombres de clusters formés dans le pire et dans le meilleur des cas sont égaux. Plus le nombre d'agents est important plus la différence est grande. Avec  $n_e = 50$ , le nombre de clusters formés dans le pire des cas est à 95% plus important que le

nombre de clusters formés dans le meilleur des cas.

**Propriété 19** *Le nombre de clusters  $m$  dans lesquels un attribut  $e$  est négocié est borné :*

$$\sum_{q=1}^Q U_{S_q} \leq m \leq \frac{n_e!}{2!(n_e-2)!}$$

Dans notre mécanisme de négociation, plusieurs attributs peuvent être négocié dans un cluster.

**Propriété 20** *Lorsque tous les agents s'intéressent à tous les attributs, le nombre  $m$  de clusters qui seront formés est borné quelque soit le nombre d'attributs.  $\sum_{q=1}^Q U_{S_q} \leq m \leq \frac{n_e!}{2!(n_e-2)!}$ . Dans chaque cluster, les agents négocient sur tous les attributs en même temps.*

**Propriété 21** *Lorsque les agents s'intéressent à des sous-ensembles d'attributs qui sont disjoints aucun cluster ne sera formé. Ce cas est moins intéressant car il n'y aura pas de négociation.*

**Propriété 22** *Lorsque les agents s'intéressent à des sous-ensembles d'attributs qui sont non disjoints, le nombre de clusters qui seront formés dépendra du degré de similarité des agents en fonction de leur sous-ensemble d'attributs.*

La similarité entre deux agents est mesurée par le nombre d'attribut qu'ils ont en commun.

## VIII. Conclusion

Ce chapitre a présenté un mécanisme de négociation multilatérale dans lequel les agents négocient sur plusieurs attributs. Nous nous sommes placés dans un contexte où les agents accordent des niveaux d'importance différents aux attributs sur lesquels ils négocient. Dans cette contribution, nous avons mis l'accent sur les stratégies de concession des agents durant la négociation. Chaque agent définit pour chaque attribut une tactique de négociation en fonction du poids de cet attribut.

Le mécanisme de négociation que nous avons proposé se fonde sur les techniques de clustering hiérarchique. Au début de la négociation, chaque agent est considéré comme une alliance singleton. Pendant chaque phase de négociation, les alliances sont regroupées par paires. Dans chaque cluster, les agents/alliances négocient pour trouver une solution partielle concernant chaque attribut qu'ils ont en

commun.

Nous avons proposé un mécanisme centralisé de formation de clusters. Ce choix est justifié par le fait nous avons supposé que les sous-ensembles d'attributs des agents sont des informations publiques. Chaque agent peut connaître les agents avec lesquels ils partagent ses attributs. Dans ce contexte, nous avons jugé que la formation des clusters de manière centralisée est plus appropriée. Cependant, l'inconvénient réside dans le fait que cette étape de la négociation est déléguée au système. Mais nous rappelons que la négociation qui s'effectue dans chaque cluster est entièrement décentralisée. Elle s'effectue sans médiateur.

Dans notre mécanisme de négociation, les agents forment des clusters en fonction des attributs qu'ils ont en commun sans tenir compte des poids qu'ils donnent aux attributs. Dans ce cas, les agents d'un cluster peuvent accorder des niveaux d'importance différents aux attributs sur lesquels ils négocient. En effet, cela peut avoir un impact sur le résultat de la négociation. Nous rappelons que lorsque les agents d'un cluster forment une nouvelle alliance, ils doivent ensemble définir pour chaque attribut, une tactique de négociation commune. Cette tactique s'appuie sur l'agrégation des poids des attributs concernés. De ce fait, lorsque les différences entre les poids sont importantes la formation d'alliance peut être moins bénéfique pour certains agents.

Une amélioration de notre mécanisme peut consister à intégrer le poids des attributs dans les critères de formation des clusters. Nous rappelons que les poids que les agents donnent aux attributs sont des informations privées. De ce fait, le processus de formation des clusters peut s'effectuer de manière décentralisée.

Dans le chapitre suivant nous présentons les résultats empiriques obtenus concernant nos trois contributions.

# Chapitre 6

## VALIDATION EMPIRIQUE

*Dans ce chapitre, nous présentons les évaluations empiriques de nos différentes contributions. L'objectif est d'analyser les performances des trois mécanismes de négociation présentés respectivement dans les chapitres 3, 4 et 5. Ainsi, nous avons implémenté sous java et jade ces mécanismes.*

## I. Méthodologie générale

L'objectif de nos mécanismes de négociation est de faciliter la recherche d'accords collectifs. Dans la plupart des mécanismes de négociation multilatérale existants, tous les agents négocient en même temps au sein d'un groupe [7]. Nous avons montré, dans le chapitre 3, les différents problèmes que posent les extensions du protocole des offres alternées [7] par rapport aux contextes de négociation considérés. Ces problèmes résident dans la difficulté à trouver des accords collectifs lorsque le nombre d'agents et le nombre d'attributs sont importants. Cela peut être dû au fait que chaque agent soumet ses offres et n'évalue celles des autres que lorsque son tour arrive (voir la figure 2.1) ou par le fait que la communication entre les agents s'effectue par diffusion (voir la figure 2.2).

Ainsi, pour atteindre nos objectifs, nous avons préconisé des mécanismes de négociation originaux qui consistent d'abord à répartir les agents en plusieurs groupes. Le but recherché dans cette répartition est de réduire la complexité du raisonnement des agents en limitant leurs champs d'interaction. Ensuite, nous avons proposé des protocoles de négociation qui permettent aux agents de négocier de façon incrémentale. La démarche incrémentale préconisée a pour objectif de permettre à chaque agent de prendre des décisions satisfaisantes et de défendre ses propositions. Les politiques d'interaction inter-groupes proposées ont pour but de rendre flexible la négociation et de faciliter la recherche d'accords. Nous avons aussi proposé des stratégies de négociation qui permettent aux agents de faire des concessions. Ces stratégies consistent pour chaque agent à réviser à la baisse ses aspirations au cours de la négociation et lorsqu'il ne trouve pas un accord.

L'évaluation empirique des trois mécanismes de négociation proposés consiste à vérifier ces différentes hypothèses.

Les principaux critères de performance que nous avons mesurés sont :

- Le taux de convergence de la négociation, c'est-à-dire le taux d'accords obtenu.
- Le temps de la négociation, c'est-à-dire la durée moyenne de la négociation.
- La qualité de la solution, c'est-à-dire la satisfaction des agents par rapport à la solution finale trouvée.

Pour mesurer les performances de nos différents mécanismes de négociation, nous les avons comparés aux modèles existants dans lesquels les agents négocient dans un seul groupe et sans médiateur. Ces modèles s'appuient sur le protocole des offres alternées.

Dans la suite de ce chapitre, nous détaillons pour chaque mécanisme proposé, le modèle avec lequel nous le comparons, la méthodologie utilisée ainsi que les critères de performance additionnels mesurés, le scénario de négociation utilisé, le déroulement de l'expérimentation ainsi que ses différentes étapes et les résultats obtenus.

## II. Évaluation de la première contribution

La proposition 1 présentée dans le chapitre 3 est un protocole de négociation multilatérale distribué dans lequel les agents sont répartis initialement en plusieurs groupes (anneaux) selon leur poids ou aléatoirement. La négociation s'effectue simultanément dans chaque anneau. Les agents interagissent en échangeant leurs propositions. Chaque proposition soumise peut devenir la solution de la négociation si elle est acceptée par la majorité. Un agent peut changer d'anneau pour mieux défendre ses propositions et obtenir la majorité. La négociation s'effectue en plusieurs tours séparés par des points de contrôle permettant de vérifier si une solution est trouvée.

### 1 Analyse et méthodologie

La répartition des agents en plusieurs groupes consiste d'abord à déterminer le nombre de groupes et ensuite, à choisir la stratégie d'affectation des agents dans ces groupes. Le choix du nombre de groupes à former et de la stratégie d'affectation peut avoir un impact sur le résultat de la négociation.

Analysons par exemple le cas où  $n$  agents forment  $\lfloor n/2 \rfloor$  anneaux (le nombre maximum de groupes). Dans chaque groupe, il y a deux agents et lorsque  $n$  est impair l'un des groupes comporte 3 agents. Nous citons ci-dessous quelques difficultés qui peuvent survenir lorsque les agents suivent notre protocole de négociation.

- Chaque agent cherche à faire accepter ses propositions par la majorité des agents. Cependant, lorsque le nombre de groupes est important, un agent va devoir écouter plusieurs groupes et déterminer celui qu'il va rejoindre à un moment donné. Ainsi, il mobilisera plus de ressources pour évaluer les groupes.

- Chaque agent se déplacera dans plusieurs anneaux pour soumettre ses propositions afin de convaincre les autres de les accepter. Lorsque le nombre de groupes est important, l'agent peut ne pas avoir la possibilité de soumettre ses propositions à un nombre maximum d'agents. Nous rappelons que le nombre de déplacements qu'un agent peut effectuer est limité.

Les problèmes évoqués ci-dessus peuvent avoir un impact sur le résultat de la négociation. La recherche d'accords peut s'avérer difficile.

Pour pallier ces problèmes, nous avons préconisé une méthode qui permet de calculer le nombre de groupes à former en fonction de la dispersion du poids des agents.

La méthodologie utilisée pour vérifier l'impact du nombre de groupes à former sur le résultat de la négociation consiste à expérimenter plusieurs scénarios de négociation en faisant varier le nombre d'agents et d'anneaux. Nous avons évalué et comparé les taux d'accord obtenus. Dans nos expérimentations, les agents sont affectés aléatoirement dans les groupes.

Pour évaluer les autres critères de performances tels que le temps de la négociation, la qualité de la solution et les taux de messages, le nombre de groupe à former est calculé en fonction des poids des agents.

Pour montrer les performances du mécanisme de négociation proposé, nous les comparons à un mécanisme de négociation dans lequel tous les agents négocient dans un seul groupe. Dans ce mécanisme de négociation, les agents forment un seul groupe et négocient en plusieurs tours séparés par des points de contrôle. Lors d'un tour de négociation, tous les agents soumettent leurs propositions et chacun évalue celles qu'il a reçues et prend ses décisions. Les agents échangent entre eux selon les règles d'interaction définies pour le mécanisme proposé. Évidemment, les règles de mobilité et la politique d'interaction inter-groupes (FIC) ne peuvent s'appliquer car il existe un seul groupe dans lequel les agents effectuent leurs échanges.

Pour montrer l'impact des stratégies de concession proposées, nous avons analysé l'évolution des taux d'acceptation des propositions dans les deux modèles de négociation que nous comparons.

## 2 Scénario et déroulement de l'expérimentation

Pour réaliser nos simulations, nous avons utilisé l'exemple du projet de tramway. Une liste de propositions et un ensemble de critères d'évaluation sont prédéfinis. Lors d'un test, chaque agent sélectionne aléatoirement un sous-ensemble de propositions et un sous-ensemble de critères avec lesquels il évalue les propositions qu'il soumet et qu'il reçoit.

Nous présentons ci-dessous quelques critères d'évaluation d'un itinéraire proposé pour la ligne de tramway :

- Critère d'intercommunalité : l'itinéraire d'une ligne de tramway peut desservir plusieurs communes. Une proposition peut être évaluée en fonction du nombre de communes que la ligne va desservir. Les maires des communes peuvent s'intéresser à ce critère dans le but de mutualiser les coûts de financement du projet. Par exemple, un maire favorisera plus les propositions avec plusieurs communes qui seront desservies.
- Critère d'accessibilité : L'objectif d'une desserte par tramway est de faciliter l'accès aux établissements et lieux publics tels que : les services culturels, les services de santé, et les services de sécurité. Une proposition d'un itinéraire pour la ligne de tramway peut être évaluée en fonction du nombre d'établissements publics desservis. Le préfet et les maires peuvent s'intéresser à ce critère afin d'améliorer l'accès à leur personnel et aux usagers. Ils favoriseront alors les propositions avec plus d'établissements desservis.
- Critère inter-modal : Les correspondances au niveau des arrêts d'une ligne de tramway permettent aux usagers de prendre d'autres transports tels que : les bus, les vélos, les métros. Pour faciliter ces correspondances, les compagnies de transport favoriseront les propositions dont les coordonnées des arrêts sont proches des stations de métro, de bus ou de vélos.

Nous modélisons ces critères par  $\{x_1, x_2, x_3\}$ . Ces critères sont respectivement le nombre de communes desservies, le nombre de services publics desservis, et le nombre de correspondances.

L'ensemble des propositions sont générées comme suit : une proposition est constituée d'un ensemble de coordonnées représentant les adresses des arrêts de la ligne de tramway. Chaque adresse d'un arrêt  $i$  est composée de trois attributs :  $num_i, street_i, zip_i$  représentant respectivement le numéro de rue, le nom de la rue

et le code postal. Formellement, une proposition  $p_\alpha$  est représentée comme suit :

$$p_\alpha = \{(num_1, street_1, zip_1), \dots, (num_k, street_k, zip_k)\}$$

Chaque proposition est générée avec les paramètres tels que : le nombre

Proposition $p_\alpha$			
Arrêts ( $stp_i$ )	$num_i$	$street_i$	$zip_i$
$stp_1$	8	teta	005
$stp_2$	26	gamma	005
$stp_3$	5	alpha	003
$stp_1$	32	sigma	001

TABLE 6.1: Exemple de proposition

d'établissements desservis, le nombre de correspondances, le nombre de communes desservies. Elle est aussi associée à un ensemble d'arguments positifs et négatifs. Un argument positif est, par exemple, une information qui décrit les avantages d'une proposition : "Proximité des postes de police par rapport à certains arrêts" que suggère la proposition. Cet argument peut par exemple convaincre un agent tel que le préfet à accepter une telle proposition au regard de ses préoccupations pour la sécurité de la population. Un argument négatif est par exemple l'absence ou l'éloignement des postes de police. Les arguments des propositions sont générés aléatoirement pour chaque proposition.

Dans le mécanisme de négociation proposé, les attaques et les renforcements des propositions sont pris en compte dans l'évaluation de la valeur de support d'une proposition.

Nous avons effectué plusieurs expériences en faisant varier le nombre d'agents, le nombre d'anneaux. Chaque agent sélectionne aléatoirement un sous-ensemble de propositions et le(s) critère(s) avec le(s)quel(s) il évalue les propositions.

La durée limite de la négociation et le nombre de points de contrôle varient selon le nombre d'agents. Pour chaque expérience, nous avons mesuré le taux de convergence, le temps de la négociation et la qualité de la solution. Le taux de convergence est le rapport entre le nombre de fois qu'une solution est trouvée et le nombre d'itérations de négociation effectuées. Nous avons fait varier le nombre d'agents  $n$  de 5 à 50 et le nombre d'anneaux  $m$  de 1 à 25. Pour un nombre  $n$  d'agents, on peut créer au plus  $\lfloor n/2 \rfloor$ . Chaque anneau doit avoir au moins deux agents.  $m = 1$ , correspond au modèle de négociation dans lequel tous les agents négocient dans un seul anneau.

Les étapes de la simulation sont :

- Génération des propositions : pendant chaque test un ensemble de 30 propositions sont créées aléatoirement.
- Création des agents : chaque agent sélectionne aléatoirement un sous-ensemble de propositions et les classe en ordre de préférence. Ensuite, il détermine en fonction des propositions dont il dispose ses seuils d'utilités; c'est-à-dire ses aspirations.
- Répartition des agents : les agents sont affectés dans les groupes de manière aléatoire.
- Négociation entre les agents : dans chaque groupe, les agents échangent leurs propositions. Chaque agent peut accepter, refuser, attaquer ou renforcer les propositions qu'il reçoit.
- Les points de contrôle : le nombre de points de contrôle est fixé à trois et à des intervalles de temps régulier. Pendant chaque point de contrôle, toutes les propositions qui ont été soumises, sont évaluées. S'il existe une proposition avec un taux d'acceptation supérieur à 50% alors le processus de négociation s'arrête sinon une autre phase de négociation recommence si le nombre de points de contrôle fixé n'est pas encore atteint.

### 3 Résultats empiriques

Taux d'accord de la négociation :

Les figures 6.2 et 6.1 présentent les résultats que nous avons obtenus.

	$n = 5$	$n = 10$	$n = 20$	$n = 30$	$n = 40$	$n = 50$
$m = 1$	0.25	0.33	0.16	0.16	0.1	0.1
$m = 2$	0.83	0.66	0.5	0.5	0.25	0.5
$m = 5$		0.5	0.66	0.66	0.5	0.66
$m = 10$			0.5	0.5	0.75	0.75
$m = 15$				0.33	0.66	0.5
$m = 20$					0.33	0.25
$m = 25$						0.25

TABLE 6.2: Taux de convergence

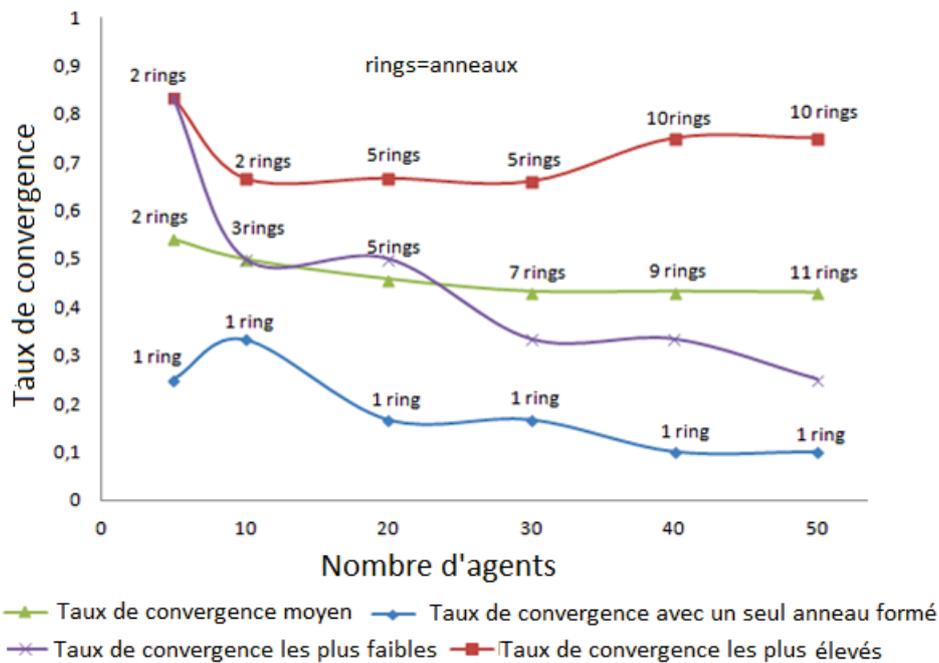


FIGURE 6.1: Taux de convergence de la négociation en fonction du nombre d'anneaux

Table 6.2 montre que les taux de convergence de la négociation obtenus lorsque tous les agents forment un seul groupe sont plus faibles que ceux obtenus lorsque les agents sont répartis en plusieurs groupes (anneaux). Cela montre que le mécanisme de négociation proposé facilite la recherche d'accords.

La figure 6.1 montre que le nombre d'anneaux formés par les agents a un impact sur le résultat de la négociation. Par exemple, lorsque le nombre d'agents est supérieur à 20, nous observons que la formation de  $\lfloor n/2 \rfloor$  anneaux conduit à des taux de convergence plus faibles mais qui sont toujours meilleurs que lorsqu'un seul anneau est formé. La courbe colorée en violet représente le taux de convergence de la négociation lorsque  $\lfloor n/2 \rfloor$  anneaux sont formés. Les taux sont plus faibles comparés au cas où le nombre d'anneaux est plus petit que  $\lfloor n/2 \rfloor$ .

### Temps de la négociation

La figure 6.2 représente le temps moyen de la négociation pour trouver un accord. Elle montre que lorsque le nombre d'agents est supérieur à 30, le processus de négociation converge plus vite, comparé au modèle de négociation dans lequel tous les agents forment un seul groupe pour négocier. Ces résultats montrent que notre protocole limite le temps de la négociation lorsque le nombre d'agents est important.

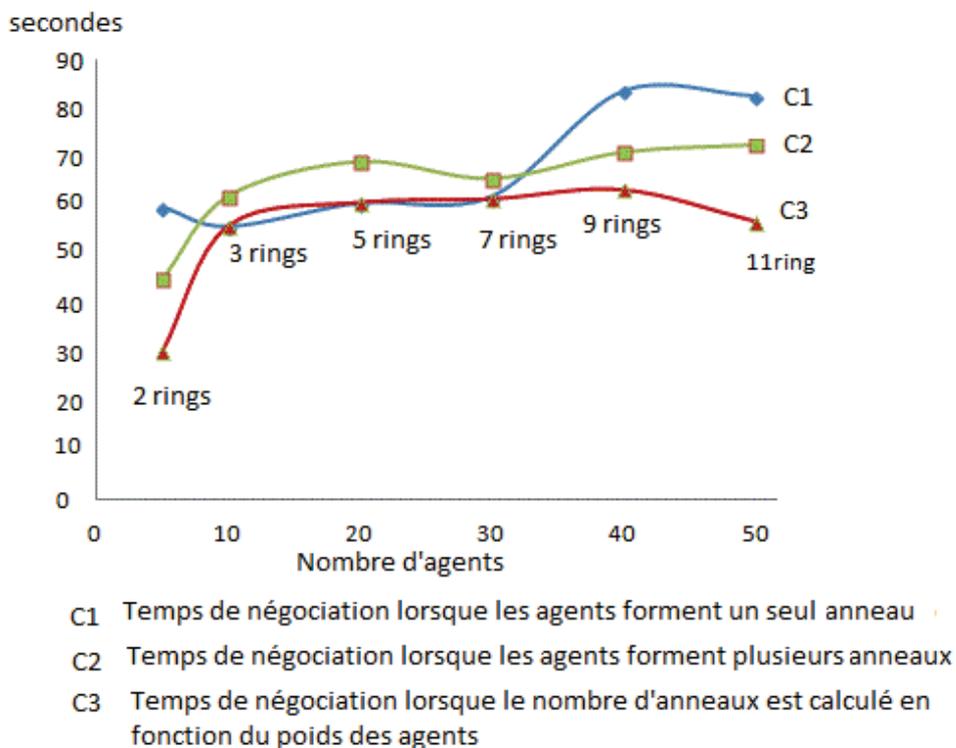


FIGURE 6.2: Temps de la négociation

#### Le taux d'acceptation des propositions :

Les courbes de la figure 6.3 montrent l'évolution du nombre d'acceptations des propositions pour  $n = 5$  agents,  $n = 10$  agents et  $n = 30$  agents. Les courbes en pointillés représentent les résultats obtenus lorsque tous les agents forment un seul groupe et celles en traits pleins représentent les résultats lorsque les agents sont répartis en plusieurs groupes. Ces courbes montrent que les propositions sont acceptées plus facilement dans le protocole proposé. Cela prouve que notre protocole favorise la convergence de la négociation.

#### Qualité de la solution

La figure 6.4 montre la comparaison entre notre modèle de négociation distribuée et le modèle de négociation centralisée (lorsqu'un seul anneau est formé) selon la qualité moyenne de la solution. La qualité de la solution pour chaque agent est l'écart entre l'utilité de la solution et son aspiration maximale. La qualité moyenne est le rapport entre la somme des qualités individuelles et le nombre total d'agents.

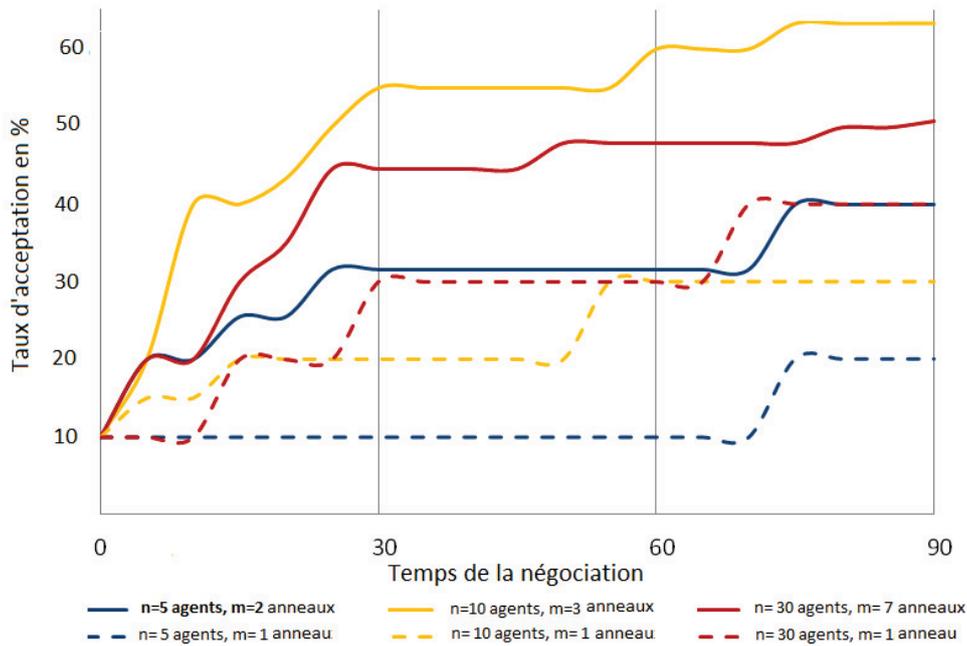


FIGURE 6.3: Acceptation moyenne des propositions soumises en fonction du temps.

Nous observons que les solutions obtenues lorsque le nombre d'agents augmente sont meilleures dans notre modèle que dans le modèle de négociation centralisée. Soit  $Q_s^m$  la qualité moyenne obtenue par tous les agents pour une proposition  $p$ .

$$Q_s^m = \frac{1}{n} \sum_{a_i} u_{a_i}(p) - U \max_{a_i}$$

#### 4 Les variantes du protocole

Dans cette section, nous avons analysé l'impact du temps de négociation sur le résultat de la négociation. Dans le mécanisme de négociation proposé, la négociation s'arrête lorsqu'au moins une solution est trouvée lors d'un point de contrôle. Autrement dit, la négociation peut s'arrêter avant que le temps imparti à la négociation soit atteint. Une variante du protocole consiste alors à prolonger la négociation une fois qu'une première solution est trouvée. L'objectif est d'analyser si les agents vont aboutir à une meilleure solution. Nous avons défini plusieurs règles d'achèvement de la négociation permettant aux agents de décider de continuer ou non la négociation. Chaque règle correspond à une variante du modèle de négociation proposé.

–  $V_1$  : La négociation s'arrête lorsqu'une solution est trouvée lors d'un point de

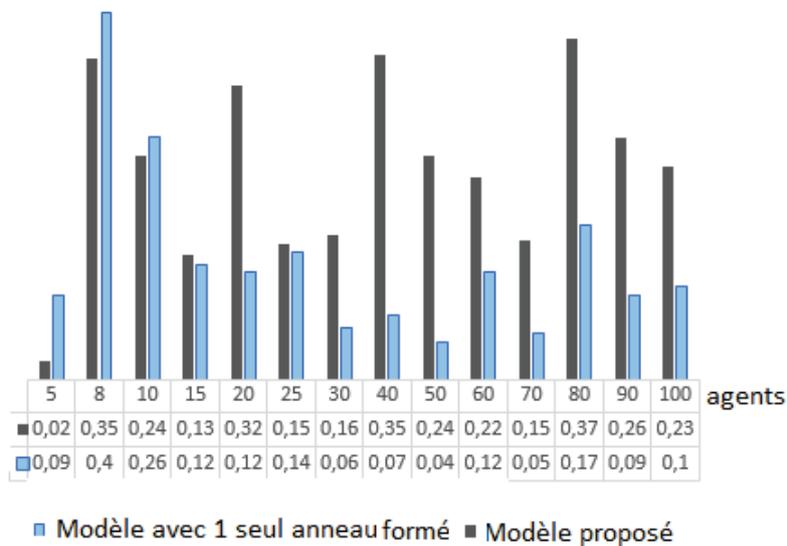


FIGURE 6.4: Qualité de la solution de négociation

contrôle. C'est le cas de notre modèle de base.

- $V_2$  : Lorsqu'une solution est trouvée avant la date limite, la négociation est poursuivie jusqu'au prochain point de contrôle si la majorité des agents est d'accord sinon elle s'arrête.
- $V_3$  : Lorsqu'une solution est trouvée avant la date limite, la négociation est poursuivie jusqu'au prochain point de contrôle si tous les agents sont d'accord sinon elle s'arrête.
- $V_4$  : Lorsqu'une solution est trouvée avant la date limite, la négociation est poursuivie jusqu'à la date limite de la négociation si la majorité des agents est d'accord sinon elle s'arrête.
- $V_5$  : Lorsqu'une solution est trouvée avant la date limite, la négociation est poursuivie jusqu'à la date limite de la négociation si tous les agents sont d'accord sinon elle s'arrête.
- $V_6$  : Lorsqu'une solution est trouvée avant la date limite, la négociation est poursuivie jusqu'à l'obtention d'une meilleure solution ou jusqu'à la date limite de la négociation si la majorité des agents est d'accord sinon elle s'arrête.

- $V_7$  : Lorsque qu'une solution est trouvée avant la date limite, la négociation est poursuivie jusqu'à l'obtention d'une meilleure solution ou jusqu'à la date limite de la négociation si tous les agents sont d'accord sinon elle s'arrête.

## 5 Étude comparative des différentes variantes du protocole

Dans les variantes  $V_3, V_5, V_7$ , les agents décident à l'unanimité de continuer ou non la négociation alors que dans  $V_2, V_4, V_6$  c'est la règle de la majorité qui s'applique. Nous avons implémenté les variantes  $V_2, V_4, V_6$  et nous les avons comparées avec celle  $V_1$  qui correspond à notre modèle d'origine. Les critères de performance mesurés sont le taux de convergence, le temps de la négociation, le taux de messages et la qualité de la solution. La figure 6.5 compare les taux de convergence

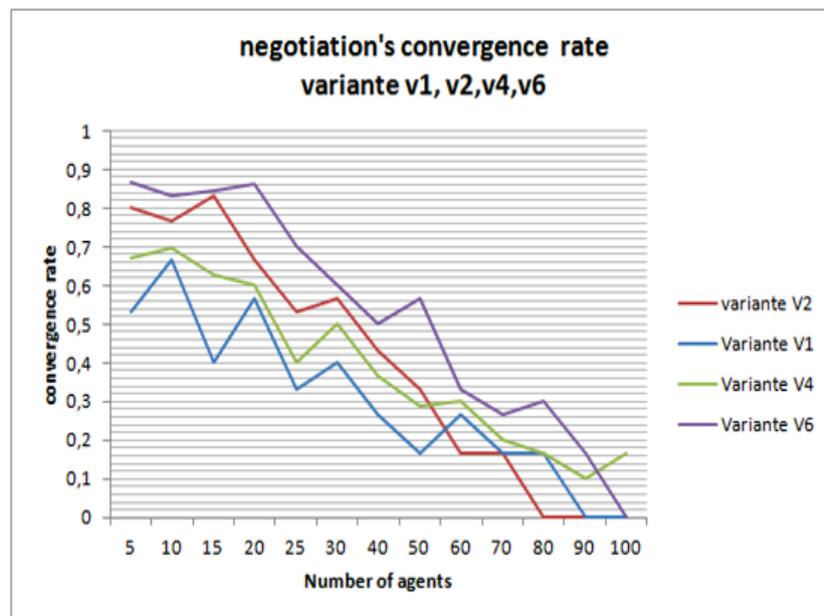


FIGURE 6.5: Courbe comparative taux de convergence entre  $V_1, V_2, V_4$  et  $V_6$

de la négociation lorsque les agents négocient selon les variantes  $V_1, V_2, V_4$  et  $V_6$ . Nous observons qu'avec  $V_2, V_4$  et  $V_6$  les taux de convergence sont meilleurs, comparés à  $V_1$ . Nous pouvons conclure que la négociation converge mieux lorsque les agents ont la possibilité de continuer la négociation. Un agent  $a_i$  dont l'utilité de la solution est inférieure à son aspiration maximum  $U_{max_{a_i}}$  votera pour poursuivre la négociation.

Le temps de la négociation et le nombre de messages échangés deviennent plus importants dans  $V_2, V_4, V_6$  (voir courbes 6.7 et 6.8.)

La figure 6.6 montre qu'avec les variantes  $V_2, V_4$  et  $V_6$  les solutions sont de

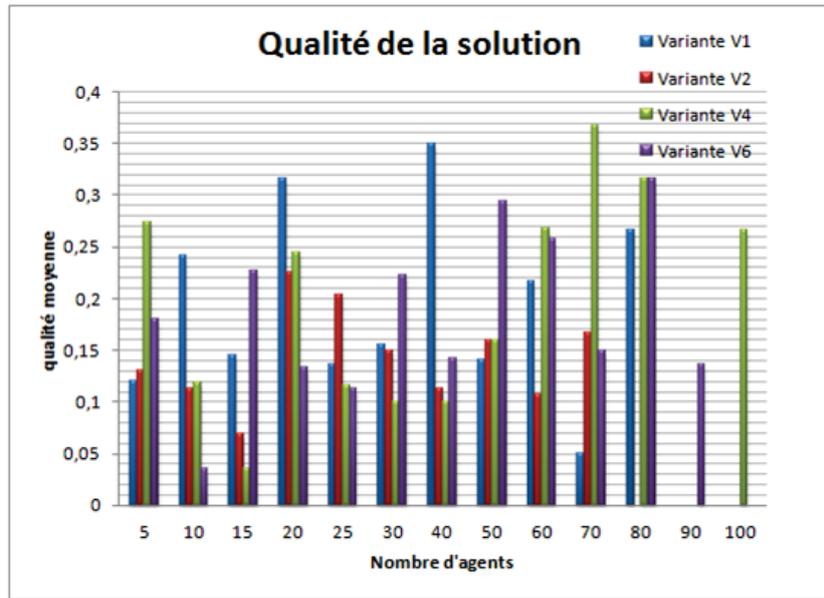


FIGURE 6.6: Courbe comparative de la qualité de la solution entre  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_4$  et  $V_6$

meilleure qualité. Plus les agents négocient, plus ils vont trouver une meilleure solution. Cependant, le temps de la négociation est plus long et les échanges de messages sont plus importants (voir les figures 6.7 et 6.8). Pour la variante  $V_4$  on obtient une meilleure qualité de solution mais avec un temps de négociation plus long (voir figure 6.8). La figure 6.7 montre que les taux de messages échangés sont

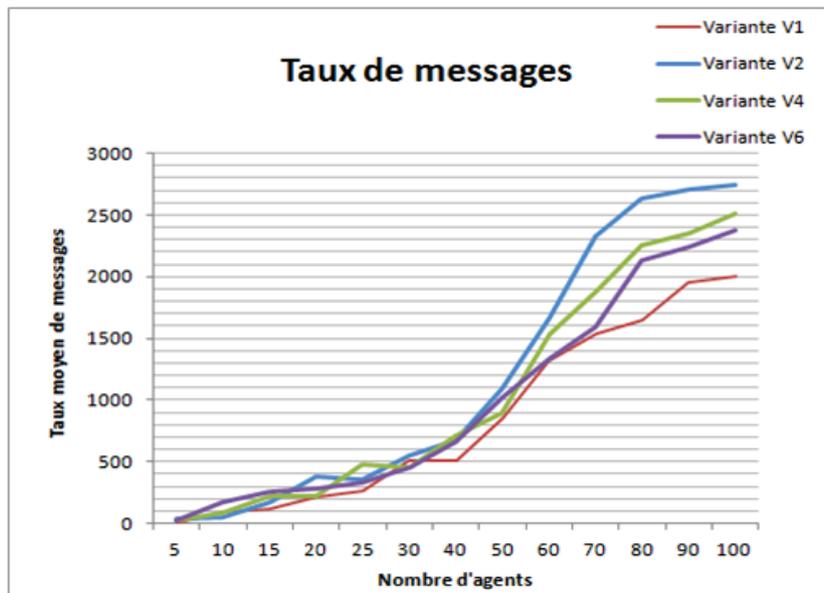


FIGURE 6.7: Courbe Comparative des taux de messages  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_4$  et  $V_6$

plus importants dans  $V_2$ ,  $V_4$  et  $V_6$  que dans  $V_1$ . Les agents continueront à s'envoyer

des messages pour la recherche d'une meilleure solution.

Les agents non satisfaits de la solution courante voudront continuer à négocier pour trouver une meilleure solution, en revanche, ceux qui sont déjà satisfaits chercheront à arrêter la négociation.

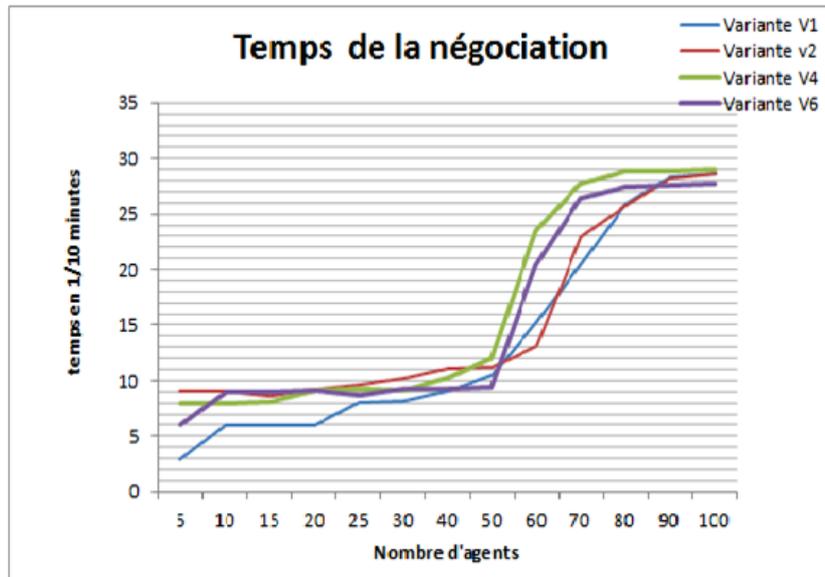


FIGURE 6.8: Courbe Comparative du temps de négociation entre  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_4$  et  $V_6$

### III. Évaluation de la deuxième contribution

La proposition 2 de cette thèse, présentée dans le chapitre 4, aborde la négociation multi-attributs dans laquelle les agents n'ont pas les mêmes intérêts concernant les attributs en jeu. Chaque agent peut s'intéresser seulement à une partie des attributs. Ainsi, les propositions d'un agent ne portent que sur les attributs sur lesquels il négocie (propositions partielles). Le protocole de négociation proposé consiste à répartir initialement les agents en groupes selon la similarité de leur choix sur les attributs à négocier. La négociation s'effectue en parallèle dans chaque groupe et en plusieurs tours. Les sous-ensembles d'agents acceptant les mêmes propositions forment des alliances. Ces alliances partageant ou non des attributs forment des groupes pour fusionner leurs propositions et devenir une alliance plus grande avec une proposition portant sur plus d'attributs. La négociation se termine par un succès lorsqu'il existe une alliance formée par la majorité des agents avec une proposition complète.

## 1 Scénario et déroulement de l'expérimentation

Nous avons implémenté en java le mécanisme de négociation proposé pour analyser ses performances. Nous nous sommes basés sur le scénario d'achat groupé d'énergie. Chaque foyer est représenté par un agent et les éléments du contrat d'énergie représentent les attributs sur lesquels ils vont négocier. Pour tester le mécanisme proposé, nous avons d'abord évalué le nombre de tours de négociation que les agents effectuent pour former les groupes initiaux. Ensuite, nous avons analysé le facteur de complexité  $Dc$ , présenté dans la section VI. du chapitre 4, en fonction du nombre d'agents et d'attributs à négocier.

Nous avons réalisé plusieurs tests (350 fois) en faisant varier le nombre d'agents  $n$  et le nombre d'attributs  $k$ . Pour chaque test, chaque agent choisit au hasard un sous-ensemble d'attributs parmi un ensemble d'attributs prédéfini. Chaque agent cherche à former un groupe avec ceux avec lesquels il partage le maximum d'attributs. Ainsi, chaque agent évalue un autre en fonction du nombre d'attributs qu'il partage avec cet agent.  $u_g(a_j) = |E_{a_i} \cap E_{a_j}|$ ,  $u_g \in [0, \gamma_i]$  la fonction qui permet à un agent  $a_i$  d'évaluer un agent  $a_j$  pendant le processus de formation de groupes.

## 2 Résultats empiriques

La table 6.3 montre le nombre  $m$  de groupes initiaux formés en fonction du nombre d'agents et du nombre d'attributs  $k$ .  $r$  représente le nombre de tours de négociation que les agents ont effectués pour former les  $m$  groupes. Les résultats obtenus montrent que le nombre de tours de négociation  $r$  dépend plus du nombre d'attributs à négocier. Par exemple, lorsque le nombre d'attributs  $k$  est égal à 20 le nombre de tours de négociation est presque le même lorsque le nombre d'agents augmente.

Le nombre de groupes à former dépend du nombre d'agents et du nombre d'attributs. La figure 6.9 montre le degré de complexité  $Dc$  en fonction du rapport entre le nombre d'agents et le nombre d'attributs. Nous notons par  $r_{n,k} = n/k$  le ratio entre le nombre d'agents  $n$  et le nombre d'attributs  $k$ .

La figure 6.9 montre que pour 16,6% des simulations réalisées,  $Dc = 0$  avec  $r_i = 6/16 = 0.4$ , pour 54,6%,  $0 < Dc < 1$  avec  $r_i = 34/13 = 2.6$  et pour 30%,  $Dc = 1$  avec  $r_i = 18/17 = 1.1$ .

## IV. Évaluation de la troisième contribution

La troisième proposition de cette thèse aborde les négociations multi-attributs dans lesquelles chaque agent peut s'intéresser seulement à une partie des attributs. Chaque agent peut accorder des importances différentes aux attributs sur lesquels

n	5	10	15	20	30	40	50
k	(m,r)	(m,r)	(m,r)	(m,r)	(m,r)	(m,r)	(m,r)
1	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,1)
5	(2,3)	(3,3)	(3,3)	(5,2)	(8,2)	(13,2)	(12,2)
10	(2,3)	(4,2)	(5,4)	(6,4)	(7,4)	(9,4)	(14,3)
15	(2,3)	(3,7)	(4,5)	(5,10)	(10,5)	(12,5)	(15,5)
20	(1,7)	(3,4)	(6,7)	(6,7)	(10,7)	(10,7)	(13,7)

TABLE 6.3:  $m$  est le nombre de groupes et  $r$  est le nombre de tours de négociation pour former les groupes.

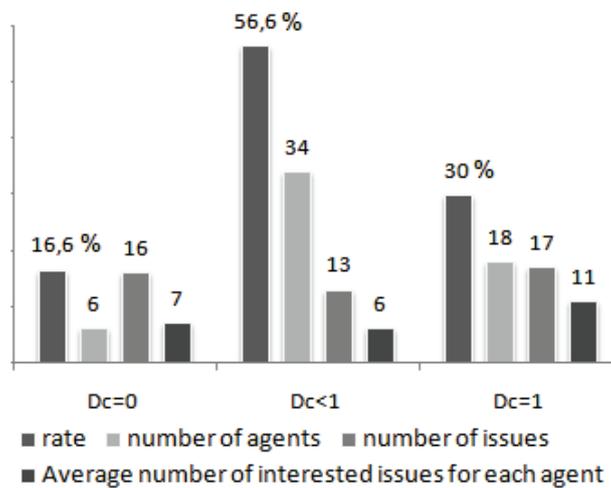


FIGURE 6.9: facteur de complexité

il focalise sa négociation. Le mécanisme de négociation proposé s'effectue de manière hiérarchique, c'est-à-dire que les agents construisent une solution à leur problème de façon incrémentale. Initialement chaque agent est considéré comme une alliance singleton qui est en accord avec lui-même sur ses propres propositions. Le processus de négociation s'effectue en plusieurs tours. Chaque tour consiste d'abord à regrouper les alliances en clusters contenant chacun deux alliances. Ensuite, chaque couple d'alliance négocie sur les attributs en commun et forme une seule alliance si leur négociation aboutit à un accord. La négociation se termine lorsqu'aucun nouveau groupe n'est formé. Une solution de négociation est trouvée lorsqu'il existe une proposition complète supportée par une alliance formée par la majorité ou la totalité des agents.

## 1 Méthodologie

Dans notre mécanisme de négociation, nous avons mis en exergue le fait que les agents peuvent donner des poids différents aux attributs sur lesquels ils négocient. Cependant, chaque agent définit, pour chaque attribut, une stratégie de négociation en fonction du poids qu'il donne à cet attribut. Ainsi, nous avons proposé des méthodes qui permettent à chaque agent de définir ses tactiques de négociation. Pour définir ces méthodes, nous avons supposé qu'intuitivement, la concession d'un agent dépend de l'importance qu'il accorde à chaque attribut sur lequel il négocie. Lorsqu'un agent accorde un poids élevé à un attribut, sa tactique de négociation pour cet attribut consistera à garder ses premières offres et ses aspirations de départ jusqu'à ce que le temps limite de la négociation approche. Lorsqu'un agent accorde un poids faible à un attribut, sa tactique de négociation pour cet attribut consiste à réviser ses aspirations à la baisse au cours de la négociation, s'il n'atteint pas ses objectifs de départ.

Les offres qu'un agent va soumettre pour un attribut dépendent de sa tactique de négociation.

Pour étudier les performances de notre protocole, nous avons analysé d'abord, les différentes méthodes de calcul des paramètres  $\beta$  que nous avons proposées et leurs impacts sur les offres que les agents soumettent. Nous rappelons que ces paramètres  $\beta$  déterminent les tactiques de négociation des agents. Ils sont calculés en fonction du poids des attributs.

Nous avons ensuite testé notre mécanisme en utilisant les différentes méthodes que les agents peuvent utiliser pour définir leurs tactiques de négociation. L'objectif est de mesurer et de comparer les taux d'accords obtenus. Nous avons également comparé les résultats obtenus à ceux obtenus lorsque tous les agents forment un seul groupe pour négocier.

## 2 Scénario et déroulement de l'expérimentation

Nous avons implémenté le modèle de négociation proposé en Java/Jade. Pour analyser les performances de notre protocole, nous avons utilisé le scénario d'achat groupé d'énergie. Les foyers doivent se mettre d'accord sur chaque élément du contrat d'énergie. Ces éléments représentent les attributs sur lesquels il vont négocier. Par exemple,  $E = \{ \text{Fournisseur d'énergie, Durée du contrat, Type de tarification, Créneau horaire, Services, Mode de paiement} \}$  désigne un ensemble d'attributs à négocier. Dans la pratique, il peut bien exister d'autres attributs.

Nous avons généré pour chaque test réalisé, un nombre  $k$  d'attributs et pour chaque attribut un domaine de valeurs possibles et un ensemble de critères d'évaluation.  $E$  est l'ensemble des attributs et pour chaque attribut  $e \in E$ ,  $D_e$  correspond à l'ensemble des valeurs générées.

Pour chaque valeur d'un attribut, une ou plusieurs valeurs de score lui sont attribuées. Ces valeurs de score représentent l'évaluation de la valeur d'un attribut selon certains critères. Par exemple, dans un contexte réel d'achat groupé d'énergie, un participant peut évaluer un fournisseur d'énergie en fonction des critères tels que : sa fiabilité, sa production d'énergie verte, les services qu'il fournit. Un tarif proposé peut être évalué en fonction de sa variabilité, c'est-à-dire, si le prix du kwh est fixe ou variable en fonction du temps. Pour chaque attribut du contrat, il peut exister plusieurs critères sur lesquels les foyers s'appuient pour évaluer les valeurs de cet attribut. Table 6.4 présente un exemple d'ensemble de fournisseurs que nous avons généré avec des valeurs de score comprises dans l'intervalle  $[0, 1]$ .

Fournisseur	Fiabilité	Production énergie verte	Services
F1	0,9	0,7	0,5
F2	0,7	0,5	0,4
F3	0,8	0,7	0,5
F4	0,6	0,7	0,8
F5	0,5	0,1	0,4
F6	0,1	0,7	0,9
F7	0,4	0,1	0,7
F8	0,8	0,3	0,9
F9	0,5	0,6	0,9
F10	0,4	0,7	0,7

TABLE 6.4: Exemple de liste de fournisseurs avec leurs valeurs de score

Pour chaque test, nous avons généré un nombre fixe d'agents. Chaque agent sélectionne aléatoirement un sous-ensemble d'attributs sur lesquels il consacre sa négociation. Pour chaque attribut, l'agent sélectionne aléatoirement un ou plusieurs critères d'évaluation prédéfinis et l'intervalle de valeurs de score (zone d'accords possibles) qu'il peut accepter.

Soit  $a_1$  un agent qui négocie l'attribut *Fournisseur*. Il évalue chaque fournisseur en fonction de sa fiabilité. Les fournisseurs qu'il peut accepter correspondent à ceux dont les scores sont dans l'intervalle  $[0.5, 1]$ . Selon les données représentées dans Table 6.4, la zone d'accords possibles de  $a_1$ , pour l'attribut fournisseur, correspond au sous-ensemble  $\{F1, F2, F3, F4, F5, F8, F9\}$ .

Soit  $a_2$  un agent qui négocie l'attribut *Fournisseur*. Il évalue chaque fournisseur en fonction des *Services* qu'il propose. Les fournisseurs qu'il peut accepter correspondent à ceux dont leurs scores sont dans l'intervalle  $[0.7, 1]$ . Selon les données représentées dans Table 6.4, la zone d'accords possibles de  $a_2$ , concernant l'attribut fournisseur, correspond au sous-ensemble  $\{F4, F6, F7, F8, F9, F10\}$ .

Chaque agent  $a_i$  dispose d'un sous-ensemble d'attributs  $E_i$  et pour chaque  $e \in E$  un ensemble de valeurs acceptables. Il affecte pour chaque attribut  $e \in E_i$  un poids  $w_e^i \in ]0, 1]$  représentant son importance. L'affectation du poids aux attributs se fait arbitrairement. Pour chaque attribut  $e$ , l'agent calcule le paramètre  $\beta_e$ .

Attribut	$[\min V_e, \max V_e]$	Domaine $D_e$	poids $w_e$	$\beta_e$
Fournisseur	[0.5 1]	$\{F1, F2, F3, F4, F5, F8, F9\}$	0.8	

Pour évaluer le mécanisme de négociation proposé, nous avons d'abord comparé les différentes méthodes de calcul du paramètre  $\beta_e$  pour un attribut  $e$ . Ensuite, nous avons réalisé la simulation de notre protocole avec chacune de ces méthodes. Nous avons effectué plusieurs tests en faisant varier le nombre d'agents, le nombre d'attributs et les méthodes de calcul des paramètres  $\beta_e$ .

### 3 Résultats empiriques

Nous avons analysé les différentes méthodes de calcul du paramètre  $\beta_e$ , présenté dans le chapitre 5, en faisant varier les paramètres tels que  $w_e$  le poids de l'attribut et  $k_e$  la valeur qui détermine la première valeur de score que l'agent souhaite obtenir.

Nous avons considéré quatre agents  $a_1, a_2, a_3$  et  $a_4$  qui doivent négocier sur un attribut  $e$ . Nous représentons dans le tableau 6.5 les paramètres pour chaque agent. Les agents utilisent la fonction polynomiale pour  $\alpha_e$ .

Pour montrer les performances de notre mécanisme de négociation, nous l'avons comparé avec un modèle dans lequel tous les agents sont réunis dans un seul groupe (cf. figure 6.14). Pour ce modèle centralisé, chaque agent soumet ses

Agent	Méthodes	$w_e^i$	$k_e^i$	$k^i$	$\beta_e^{im}$	$\beta_e^{iM}$	$\min V_e^i$	$\max V_e^i$	$V_e^{im}$ et $V_e^{iM}$
$a_1$	A et A'	0.9	0.001	0.5	0.51	22.25	0.3	1	voir Fig.6.10
$a_2$	B et B'	0.9	0.001	0.5	0.29	0.5	0.3	1	voir Fig.6.10
$a_3$	A et A'	0.9	0.5	0.5	5.01	27.5	0.3	0.65	voir Fig.6.11
$a_4$	B et B'	0.9	0.5	0.5	0.2	0.6	0.3	0.65	voir Fig.6.11

TABLE 6.5: Les paramètres de négociation

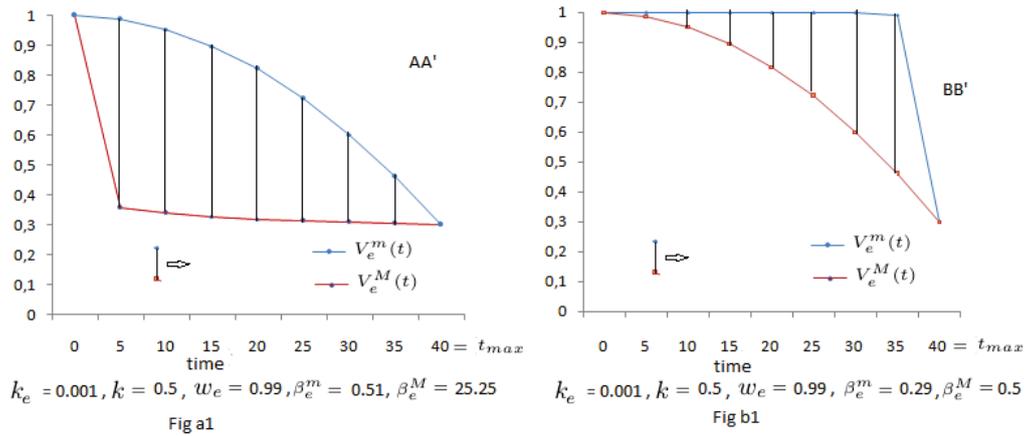


FIGURE 6.10: : Comparaison entre les intervalles de score des agents  $a_1$  et  $a_2$ .

Sur cette figure, nous représentons les fonctions  $[V_e^M(t), V_e^m(t)]$  de chacun des agents  $a_1$  et  $a_2$ . A droite nous avons les courbes pour  $a_1$  et à gauche celles de  $a_2$ . Ces courbes représentent les valeurs de score que chaque agent souhaite obtenir à l'instant  $t$  de la négociation. La courbe  $V_e^M(t)$  coloriée en bleu représente les valeurs de score maximales qu'un agent souhaite obtenir à l'instant  $t$  et celle coloriée en rouge représente les valeurs de score minimales qu'un agent souhaite obtenir à l'instant  $t$ . Ces valeurs déterminent l'intervalle de score que l'agent négocie à l'instant  $t$ . Cela veut dire que l'agent peut accepter ou offrir des propositions dont les valeurs d'utilité se trouvent dans cet intervalle. L'étendue de l'intervalle et ses bornes montrent le degré de concession de l'agent. Les résultats présentés sur cette figure montrent que l'agent  $a_1$  ayant utilisé les méthodes  $A$  et  $A'$  pour calculer ses tactiques de négociation, va concéder plus rapidement que l'agent  $a_2$  qui a utilisé les méthodes  $B$  et  $B'$ . Nous pouvons conclure que lorsque les agents utilisent les méthodes  $A$  et  $A'$  cela peut mieux garantir la convergence de la négociation que lorsqu'ils utilisent les méthodes  $B$  et  $B'$ . Cependant, la qualité de la solution (si elle existe) peut être meilleure lorsque les méthodes  $B$  et  $B'$  sont utilisées. Cela reste une hypothèse à vérifier empiriquement. Dans les travaux ultérieurs, nous avons prévu d'analyser la qualité de la solution selon les différentes méthodes que nous avons proposées.

propositions à tous les agents.

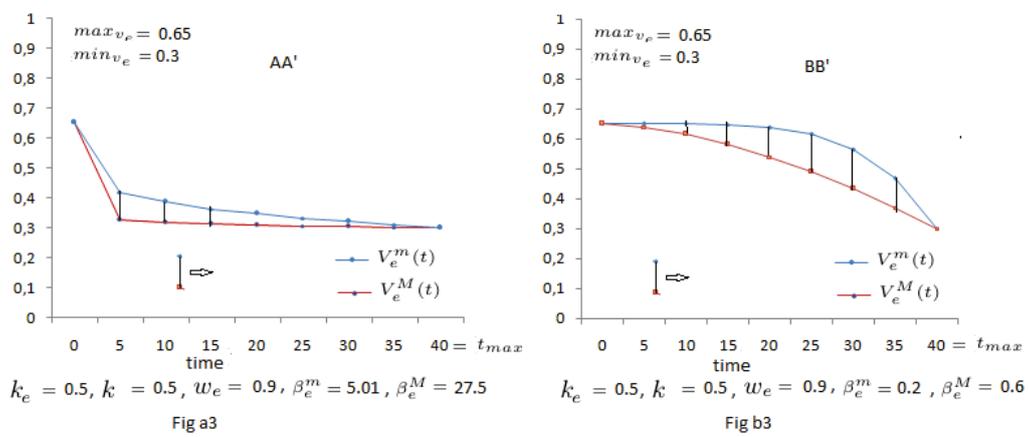


FIGURE 6.11: Comparaison entre les intervalles de score des agents  $a_1$  et  $a_2$ .  $k_e = 0.5$ . Sur cette figure, nous représentons les fonctions  $[V_e^M(t), V_e^m(t)]$  de chacun des agents  $a_1$  et  $a_2$ . A droite, nous avons les courbes pour  $a_3$  et à gauche, celles de  $a_4$ . Ces courbes montrent l'impact de la valeur du paramètre  $k_e$  sur les intervalles de score des agents. La valeur de ce paramètre détermine les aspirations maximales des agents. Cette figure nous montre que plus  $k_e$  est grand, plus les aspirations maximales de l'agent sont moins prétentieuses. Ici  $k_e = 0.5$  et la première valeur de score que les agents souhaitent obtenir est égale à 0.65.

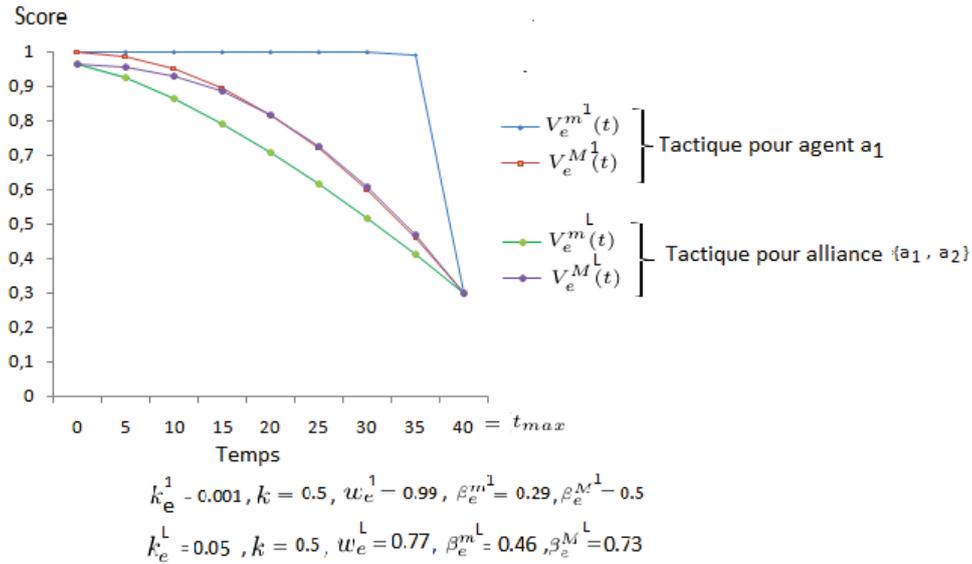


FIGURE 6.12: Comparaison entre les intervalles de score d'une alliance et d'un agent de cette alliance. Sur cette figure, nous comparons les intervalles de score d'un agent et ceux de l'alliance à laquelle il appartient. L'agent  $a_i$  a négocié avec  $a_2$  sur l'attribut  $e$  et ils ont trouvé un accord. Ensuite, les deux agents ont formé une alliance et ont défini une stratégie commune pour l'attribut  $e$ . Ainsi, cette alliance va négocier dans les prochains tours de négociation en fonction des intervalles de scores communs établis par ses membres  $a_1$  et  $a_2$ . Les courbes coloriées en bleu et rouge représentent respectivement les fonctions  $[V_e^{M1}(t), V_e^{m1}(t)]$  de l'agent  $a_1$  et celles coloriées en vert et mauve représentent respectivement les fonctions  $[V_e^{ML}(t), V_e^{mL}(t)]$  définies par l'alliance  $\{a_1, a_2\}$ .

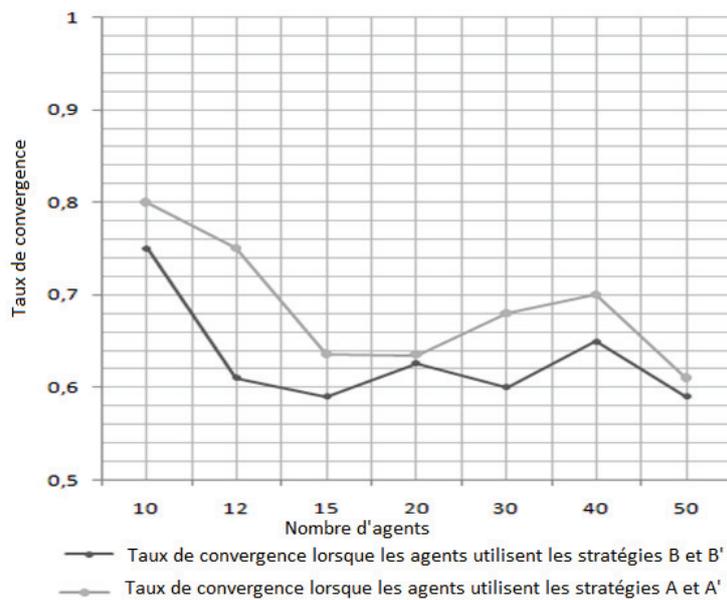


FIGURE 6.13: Comparaison des taux de convergence obtenus lorsque les méthodes  $A, A'$  et  $B, B'$  sont utilisées. Sur cette figure, nous représentons les taux de convergence obtenus lorsque les agents utilisent  $A$  et  $A'$  et lorsqu'ils utilisent  $B$  et  $B'$ . Ces courbes montrent que le taux d'accords obtenu est plus élevé lorsque les agents utilisent les méthodes  $A$  et  $A'$  pour déterminer leurs tactiques de négociation que lorsqu'ils utilisent les méthodes  $B$  et  $B'$ .

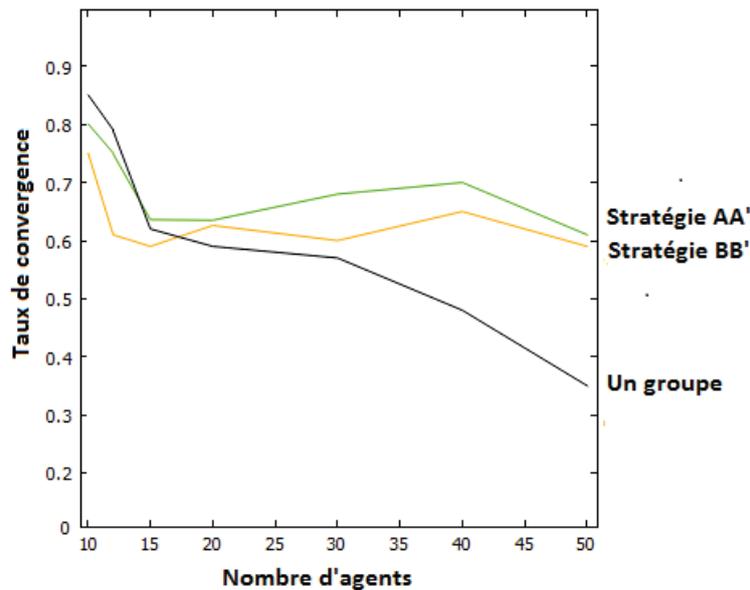


FIGURE 6.14: .

Cette figure montre les taux de convergence obtenus avec notre mécanisme de négociation et ceux obtenus avec le modèle centralisé (un seul groupe). La courbe en noir représente les taux de convergence obtenus lorsque tous les agents sont réunis dans un seul groupe, les courbes en vert et orange représentent les taux de convergence obtenus lorsque les agents suivent notre mécanisme de négociation en utilisant respectivement les stratégies AA' et BB'. Nous remarquons que lorsque le nombre d'agents est inférieur à 15, les taux de convergence obtenus avec le modèle centralisé sont plus élevés comparés à notre mécanisme. Lorsque le nombre d'agents est supérieure à 15 les taux de convergence obtenus avec notre mécanisme sont plus élevés comparés au modèle centralisé. Ainsi nous pouvons conclure que le mécanisme de négociation proposé favorise l'obtention d'accords lorsque le nombre d'agents est important.

# Chapitre 7

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Les travaux présentés dans ce manuscrit traitent des mécanismes de négociation multilatérale pour la prise de décision collective. Nous avons proposé des mécanismes de négociation qui s'appuient sur des approches heuristiques. Le but est de prendre en compte les différents aspects inhérents à la négociation réelle, notamment le fait que les agents interagissent eux-mêmes pour construire une solution à leurs problèmes sans médiateur. Dans nos mécanismes, l'espace des solutions n'est pas connu par tous les agents à la différence des travaux fondés sur la théorie des jeux. Les mécanismes de négociation proposés concernent des agents égoïstes qui ne partagent aucune information concernant leurs fonctions d'utilité ou leurs préférences. La négociation dans un tel contexte nécessite la conception de protocoles sophistiqués permettant de faciliter la recherche d'accords.

La plupart des mécanismes de négociation multilatérale proposés dans la littérature sont centralisés. Ils désignent un médiateur dont le rôle est d'analyser les préférences exprimées par les agents et de leur proposer des offres qu'ils sont susceptibles d'accepter. Ces offres ne satisfont pas toujours tous les agents. Ces approches souffrent d'un point central de défaillance. Les travaux présentés dans ce manuscrit, font avancer l'état de l'art en proposant des mécanismes de négociation décentralisée et distribuée.

Le problème avec de tels mécanismes, lorsque le nombre d'agents et le nombre d'attributs sont importants, réside dans la complexité du raisonnement des agents pour prendre des décisions satisfaisantes. Nous avons abordé cette question en mettant l'accent sur la structuration des interactions des agents. D'abord, nous nous sommes intéressés à l'organisation des agents en les divisant en plusieurs groupes dans lesquels ils interagissent. Ensuite, nous avons proposé des protocoles de négociation adaptés aux trois contextes que nous avons considérés :

– Premièrement, nous avons abordé les négociations dans lesquelles les agents ont

des poids différents et négocient sur un seul attribut.

- Deuxièmement, nous nous sommes intéressés aux négociations impliquant plusieurs attributs. Chaque agent accorde la même importance aux attributs sur lesquels il focalise ses négociations.
- Troisièmement, nous avons considéré le fait que les agents pouvaient accorder une importance différente à chaque attribut qu'ils négocient.

Les négociations multilatérales abordées dans cette thèse impliquent un nombre important d'agents ayant des intérêts différents. Leurs fonctions d'utilité, leurs préférences et leurs stratégies sont des informations privées. Chaque agent tente de conduire la négociation vers la solution qui satisfait ses objectifs. Il doit identifier les agents avec lesquels il pourra trouver facilement des accords.

## **I. La répartition des agents en groupes**

Nous avons proposé des mécanismes de négociation en nous inspirant du principe "diviser pour régner". Les agents sont répartis en plusieurs groupes dans lesquels ils négocient pour trouver des solutions partielles. Cela a pour objectif de réduire la complexité du raisonnement des agents, de faciliter la recherche d'accords, et de réduire le temps de négociation.

Dans la première contribution, les agents sont répartis en fonction de leur poids ou aléatoirement. Nous avons évalué empiriquement l'impact du nombre de groupes formés sur les résultats de la négociation. Nous avons réalisé plusieurs tests en faisant varier le nombre de groupes. Nos résultats empiriques ont montré que les performances de notre protocole de négociation dépendent du nombre de groupes choisis. Lorsque plusieurs groupes sont formés, les taux de convergence de la négociation sont moins importants. Il convient alors de trouver le nombre adéquat de groupes à former pour obtenir de meilleures performances. Nous avons proposé une méthode qui permet de déterminer le nombre de groupes à former en fonction de la dispersion du poids des agents.

Dans la deuxième contribution, nous nous sommes placés dans un contexte où les agents négocient sur plusieurs attributs. Chaque agent peut s'intéresser à une partie des attributs. Dans ce cas, ses intérêts se limitent aux attributs sur lesquels il négocie. Ainsi, ses propositions peuvent ne pas intéresser tous les agents. Le mécanisme de négociation proposé consiste à répartir les agents en fonction de

la similarité entre leurs sous-ensembles d'attributs. Le but est de permettre aux agents de négocier de façon concise et dans un cadre restreint. Nous avons analysé théoriquement le degré de complexité de la négociation en fonction de la structure des groupes initiaux formés. Nous avons testé empiriquement le mécanisme proposé. Les résultats obtenus ont montré que le nombre de tours de négociation effectués par les agents pour former les groupes ne dépend pas du nombre d'agents mais du nombre d'attributs.

Dans la troisième contribution, nous nous sommes placés dans un contexte où les agents définissent des poids différents pour les attributs sur lesquels ils focalisent leurs négociations. Les agents définissent pour chaque attribut qu'ils ont choisi, une tactique de négociation leur permettant de déterminer les offres qu'ils vont soumettre. La méthode de répartition des agents proposée est centralisée et s'appuie sur les techniques de clustering utilisées pour l'analyse des données. Nous avons analysé théoriquement le nombre de clusters dans lesquels un attribut est négocié dans le pire et dans le meilleur des cas. Nous avons montré que, quel que soit le nombre d'agents et d'attributs, le nombre de clusters est toujours borné. Cela signifie que notre mécanisme garantit la terminaison de la négociation.

L'intérêt commun des différentes méthodes de répartition des agents en plusieurs groupes est de limiter les champs d'interaction des agents afin de faciliter la convergence de la négociation. Chacune de ces stratégies de répartition tient compte du contexte de la négociation. Pour les travaux de recherche ultérieurs, il serait intéressant d'analyser l'utilisation des différentes méthodes de répartition que nous avons proposées dans des contextes de négociation plus complexes et qui s'appuient sur d'autres hypothèses. Par exemple, dans le cas où les agents ont des poids différents et accordent des importances différentes aux attributs, il s'agira d'étudier plus en détail l'impact de chacune de ces méthodes de répartition sur les résultats de la négociation.

## **II. les protocoles**

Le protocole définit les actions que les agents entreprennent pour négocier ainsi que les différentes règles à respecter. Les mécanismes de négociation multilatérale proposés s'appuient sur une approche incrémentale. Les agents négocient progressivement pour construire les solutions à leurs problèmes.

Dans la première contribution de cette thèse, chaque proposition soumise par un agent peut devenir la solution de la négociation si elle est acceptée par

la majorité des agents. Dans un tel contexte, chaque agent cherche à défendre ses propositions pour qu'elles soient acceptées par la majorité des agents. Dans chaque anneau, chaque agent cherche à convaincre les membres de son groupe d'accepter ses propositions. Selon le résultat de ses négociations, il peut décider de rejoindre progressivement les autres anneaux afin de convaincre les autres agents d'accepter ses propositions. Cette démarche incrémentale permet à chaque agent de mieux orienter ses interactions. Pour rendre flexible le protocole de négociation proposé, nous avons défini une politique d'interaction inter-anneaux. Cette politique d'interaction s'appuie sur l'écoute flottante. Chaque agent peut écouter les discussions qui s'effectuent dans les anneaux voisins afin de prendre connaissance des propositions qui y sont soumises. Cette politique d'interaction permet ainsi à chaque agent de guider ses interactions ou d'identifier les anneaux dans lesquels ses intérêts seront mieux défendus. La négociation s'effectue en plusieurs tours séparés par des points de contrôle dont le but est de vérifier si une solution acceptable a été trouvée.

Les critères de performance que nous avons analysés pour ce protocole sont la convergence de la négociation, l'évolution des taux d'acceptation des propositions et le temps de négociation. Nous avons comparé notre modèle avec celui dans lequel tous les agents sont réunis dans un seul groupe. Les résultats obtenus ont montré que notre modèle permet la convergence de la négociation et que les taux d'acceptation des propositions évoluent plus rapidement. Nous avons aussi analysé l'impact de la date limite de négociation sur le résultat de la négociation. Nous avons défini plusieurs variantes du protocole avec différentes règles pour terminer la négociation.

Dans notre deuxième contribution, les agents s'intéressent à des sous-ensembles d'attributs qui peuvent être disjoints ou non mais la solution finale de la négociation doit porter sur tous les attributs en jeu. Les agents se répartissent en groupes selon leurs similarités par rapport aux attributs qu'ils ont en commun. Dans le mécanisme proposé, nous avons mis en exergue le principe de la négociation en équipe. Un sous-ensemble d'agents qui acceptent la même proposition lors d'une négociation, forment une alliance pour la défendre dans les prochains tours. L'intérêt de former des alliances réside dans le fait que ces agents définissent une stratégie commune pour défendre leur proposition. Les alliances forment des groupes pour fusionner leurs propositions.

Dans la troisième contribution de cette thèse, nous avons utilisé la politique d'interaction RIC. Les agents appartenant à des clusters différents n'interagissent pas entre eux. Dans chaque cluster, les agents tentent d'établir des solutions

partielles concernant les attributs qu'ils partagent et forment une alliance lorsqu'ils s'accordent sur une proposition. Dans ce modèle, la flexibilité de la négociation réside dans la nature des offres soumises par les agents. Les agents peuvent soumettre pour chaque attribut un ensemble de valeurs ou une seule valeur selon la portée de l'attribut. Pour faciliter la recherche d'accords, les agents forment une alliance et définissent ensemble une tactique de négociation. Nous avons défini des stratégies permettant à chaque agent d'établir des tactiques de concession pour les attributs qui l'intéressent. Ces tactiques de concession permettent ainsi de faciliter la recherche d'accords.

### **III. Choix de solution équitable et juste**

Dans ce manuscrit, nous avons proposé une nouvelle méthode d'évaluation de la satisfaction sociale de la solution finale de la négociation. Nous nous sommes appuyés sur la théorie de justice de John Rawls. Nous avons proposé une fonction de satisfaction sociale qui utilise les scores que les agents attribuent à une proposition à la différence des approches existantes qui se basent sur les utilités des agents. Cette fonction permet d'une part, de pallier les problèmes que pose la comparaison des valeurs d'utilités lorsque chaque agent utilise sa propre échelle ; d'autre part, elle permet de choisir une solution équitable et juste.

### **IV. Perspectives**

#### **1 Pistes de recherche**

Dans notre première contribution, nous avons évalué les taux d'acceptation des propositions en fonction du nombre d'agents qui les ont acceptées sans prendre en compte leur poids. Nous rappelons que le poids d'un agent représente son importance dans la prise de décision. Il serait intéressant de prendre en compte le poids des agents dans l'évaluation des taux d'acceptation des propositions. Cela consistera à définir d'autres variantes du protocole de négociation proposé avec de nouvelles stratégies de négociation. Les tactiques de mise à jour des aspirations et la fonction de satisfaction sociale proposées ont été définies en fonction du nombre d'agents qui acceptent ou refusent les propositions sans prendre en compte leur poids. Pour d'autres variantes de notre mécanisme, il s'agira d'intégrer ce facteur et d'analyser son impact sur le résultat de la négociation.

Dans le mécanisme de négociation proposé, nous avons supposé que les agents utilisent la même stratégie d'estimation de l'évolution des propositions mais leurs

seuils d'utilités sont différents. En effet, les agents se basent sur une fonction d'estimation linéaire pour décider de défendre ou non une proposition. Il serait intéressant de définir d'autres stratégies d'estimation afin d'analyser également leurs impacts sur le résultat de la négociation.

Un autre point à améliorer consiste à définir des politiques de points de contrôle. Dans notre mécanisme, le nombre et les dates des points de contrôle sont prédéfinis. Une perspective serait de définir des stratégies et des règles plus fines pour le choix des points de contrôle. Par exemple, les points de contrôle peuvent s'effectuer à des dates variables. Une proposition de stratégie serait de dire que lorsqu'un certain nombre d'agents ont obtenu la majorité, un point de contrôle s'effectue.

Dans nos travaux futurs, nous explorerons ces pistes de manière fine et nous analyserons leur impact sur le résultat de la négociation.

Dans la troisième contribution de cette thèse, les agents forment des clusters en fonction du nombre d'attributs qu'ils partagent. Dans le processus de formation des clusters nous n'avons pas intégré le poids qu'ils donnent aux attributs. Ce dernier est un facteur important dans la stratégie de négociation des agents. Nous rappelons que lorsque les agents d'un cluster forment une alliance, ils déterminent pour chaque attribut qu'ils ont en commun une stratégie de négociation à suivre dans les prochains tours. Cette stratégie est définie en fonction de la moyenne des poids. Le problème qui se pose lorsque la moyenne des poids est effectuée réside dans le fait qu'un agent appartenant à un cluster pourra voir une augmentation ou une diminution du poids qu'il a accordé à ses attributs. Cet écart dépend de la disparité des poids que les agents ont donné à cet attribut. Par exemple, lorsque deux agents  $a_1$ ,  $a_2$  donnent respectivement les poids 0.9 et 0.1 à un attribut  $e$ , le poids moyen de cet attribut est 0.5. Lorsque ces agents forment une alliance, la stratégie commune pour  $e$  est définie selon le poids 0.5. Ainsi, l'importance de l'attribut  $e$  pour  $a_1$  est réduit de 0.4 et celle de  $a_2$  a augmenté de 0.4.

Une perspective de ce mécanisme de négociation est de proposer d'autres processus de formation de clusters qui intègrent le poids des attributs. L'objectif sera alors de regrouper par exemple en priorité les agents qui partagent le maximum d'attributs et qui ont donné des poids similaires à ces attributs. Dans nos futurs travaux, nous étudierons ces pistes et nous proposerons un processus de formation de clusters décentralisée.

## 2 Portée de nos travaux de recherche

L'intelligence artificielle a de nombreux défis sur le plan de la coordination d'un ensemble d'expertises pour simuler des comportements humains ou des situations plus complexes. Les travaux de cette thèse ont apporté une contribution sur le plan de la coordination dans les systèmes multi-agents notamment la négociation pour la prise de décision collective. Les différents mécanismes de négociation proposés trouvent leurs intérêts dans plusieurs domaines d'applications.

◆ Une application possible de nos mécanismes de négociation concerne la négociation de services dans le commerce électronique. Par exemple, les entreprises proposant différents services peuvent collaborer pour proposer des packs de services à leur clients. Considérons un client qui planifie un voyage, un pack de services peut être composé d'un billet d'avion, de la réservation d'une chambre d'hôtel et d'un programme de visites guidées. Chacun de ces services peut être proposé par un fournisseur spécifique. Cependant pour que ces fournisseurs collaborent, ils doivent se mettre d'accord sur plusieurs points. Pour cela, ils doivent aussi négocier pour mettre en place des accords. Une telle négociation implique plusieurs attributs et plusieurs partenaires. Les mécanismes de négociations proposés peuvent bien s'appliquer dans ce contexte.

◆ Les systèmes de transport intelligent (STI) regroupent l'ensemble des applications des nouvelles technologies de l'information et de la communication appliquées au domaine des transports. Ils présentent plusieurs enjeux tels que : la sécurité routière, la régulation des transports, et la gestion de la circulation. Plusieurs travaux de recherche s'inscrivent dans ces contextes. Les progrès des capteurs ont permis leur développement et nous assistons aujourd'hui à l'avènement des véhicules intelligents sans conducteur. Le défi majeur est la mise en place des modèles de coordination et de coopération des différents capteurs du système afin de répondre aux objectifs fixés. Par exemple, la gestion de la circulation intelligente nécessite des mécanismes de coordination entre les véhicules communicants. Les mécanismes de négociation proposés dans cette thèse peuvent s'intégrer dans ce contexte. Les objets communicants tels que les véhicules peuvent être représentés par des agents intelligents autonomes. Leurs interactions devront reposer sur des mécanismes de décision sophistiqués afin d'assurer une meilleure gestion du trafic et de la sécurité routière.

Considérons, par exemple, un espace dans lequel plusieurs véhicules circulent. Chaque véhicule  $v_i$  décide de quitter son point  $A_i$  pour rejoindre un point  $B_i$ . L'objectif de chaque véhicule est d'arriver à sa destination en empruntant le plus

court chemin en un minimum de temps. Cependant, il peut être difficile pour chacun d'atteindre son objectif car il partage les routes avec d'autres véhicules. Une coordination entre les véhicules peut permettre de fluidifier le trafic et à chacun de ces véhicules d'optimiser son trajet et d'éviter les embrouillages. Pour cela, nous pouvons classer les véhicules en plusieurs groupes selon la similarité de leur trajet. Par exemple, le critère de similarité peut-être la distance de proximité entre leurs points de départ et leurs points d'arrivée. Un groupe de véhicules ayant des trajets similaires peuvent éventuellement emprunter le même chemin. Dans le cas où ces véhicules prennent tous le même chemin, des phénomènes de congestion du trafic peuvent arriver. L'objectif serait de mettre en place un protocole d'interaction qui permet à ces véhicules de négocier afin d'optimiser leur trajet.

◆ La santé connectée et intelligente est une innovation numérique visant à améliorer la santé et la qualité de vie des personnes. Plusieurs projets se focalisent sur les systèmes d'assistance aux personnes dépendantes [65]. Les systèmes d'aide à la décision pour les diagnostics médicaux ou le suivi des patients s'appuient sur la coordination entre différentes entités générant des informations provenant de sources différentes. Ces systèmes doivent être soutenus par des mécanismes de décision performants. Par exemple, la collecte et l'intégration des données permettent actuellement d'améliorer le suivi médical des patients. Plusieurs agents logiciels intelligents peuvent être mis en collaboration pour extraire et exploiter de grandes quantités de données, des informations qui serviront ainsi de leviers pour établir par exemple des diagnostics plus fiables et pour trouver des stratégies de suivi efficaces.

## TABLE DES FIGURES

1.1	Contributions de la thèse . . . . .	19
1.2	Plan du manuscrit de thèse . . . . .	22
2.1	Stacked Alternating Offers Protocol . . . . .	43
2.2	Alternating Multiple Offers Protocol . . . . .	44
3.1	Négociation pour définir les coordonnées des arrêts d'un tramway .	53
3.2	Les différentes phases du mécanisme de négociation proposé . . . .	55
3.3	Seuils d'utilité et degrés de satisfaction . . . . .	63
3.4	Espace des valeurs de satisfaction sociale des propositions. . . . .	68
3.5	Structure de négociation distribuée . . . . .	70
3.6	La phase de négociation . . . . .	76
4.1	Scénario de formation des groupes . . . . .	93
4.2	Structure des groupes et d'alliances . . . . .	96
4.3	Fusion d'alliances . . . . .	98
5.1	Déroulement de la négociation . . . . .	109
5.2	Les différentes phases du mécanisme de négociation proposé . . . .	112
5.3	Formation de Clusters . . . . .	115
5.4	[31] Ces fonctions sont significativement différentes selon la valeur de $\beta$ . . . . .	123
5.5	l Comparaison des deux méthodes A et B . . . . .	124
5.6	Nombre de clusters dans lesquels un attribut $e$ est négocié lorsque $n_e = 4$ . . . . .	128
5.7	Différence entre le nombre de clusters formés dans le meilleur des cas et dans le pire des cas. . . . .	128
6.1	Taux de convergence de la négociation en fonction du nombre d'anneaux . . . . .	138
6.2	Temps de la négociation . . . . .	139
6.3	Acceptation moyenne des propositions soumises en fonction du temps. . . . .	140
6.4	Qualité de la solution de négociation . . . . .	141
6.5	Courbe comparative taux de convergence entre $V_1, V_2, V_4$ et $V_6$ . . . .	142
6.6	Courbe comparative de la qualité de la solution entre $V_1, V_2, V_4$ et $V_6$	143
6.7	Courbe Comparative des taux de messages $V_1, V_2, V_4$ et $V_6$ . . . . .	143
6.8	Courbe Comparative du temps de négociation entre $V_1, V_2, V_4$ et $V_6$ .	144

6.9	facteur de complexité . . . . .	146
6.10	Intervalle de score des agents . . . . .	150
6.11	Comparaison entre les intervalles de score des agents $a_1$ et $a_2$ . . . . .	151
6.12	Comparaison entre les intervalles de score d'une alliance et d'un agent de cette alliance . . . . .	152
6.13	Comparaison des taux de convergence obtenues lorsque les méthodes A,A' et B,B' sont utilisées. . . . .	153
6.14	Comparaison de notre mécanisme de négociation avec le modèle centralisé . . . . .	154

## LISTE DES TABLEAUX

3.1	Comparaison entre la règle de la majorité et la somme des valeurs de score . . . . .	64
3.2	Solution avec la fonction $w_s$ . . . . .	68
4.1	Classement des agents de l'exemple 11. . . . .	91
5.1	Les sous-ensembles d'attributs choisis par chaque agent . . . . .	114
5.2	Matrice de similarité selon la fonction $sim_L$ . . . . .	114
5.3	Matrice de similarité selon la fonction $sim_{L+}$ . . . . .	115
6.1	Exemple de proposition . . . . .	136
6.2	Taux de convergence . . . . .	137
6.3	$m$ est le nombre de groupes et $r$ est le nombre de tours de négociation pour former les groupes. . . . .	146
6.4	Exemple de liste de fournisseurs avec leurs valeurs de score . . . . .	148
6.5	Les paramètres de négociation . . . . .	149



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Samir Aknine, Souhila Arib, and Djamila Boukreda. Modeling a multi-issue negotiation protocol for agent extensible negotiations. In *European Conference on Multi-Agent Systems*, pages 349–359. Springer, 2014. 35, 42
- [2] Samir Aknine, Philippe Caillou, and Aurélien Slodzian. Méthode consensuelle de formation de coalitions multi-agents. In *RFIA 2004-14ème congrès francophone de reconnaissance des formes et intelligence artificielle*, pages 979–988, 2004.
- [3] Leila Amgoud and Henri Prade. Reaching agreement through argumentation : A possibilistic approach. *KR*, 2004 :175–182, 2004. 36
- [4] Bo An, Nicola Gatti, and Victor Lesser. Alternating-offers bargaining in one-to-many and many-to-many settings. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 77(1-2) :67–103, 2016. 40
- [5] Kenneth J Arrow. *Social choice and individual values*, volume 12. Yale university press, 2012. 23, 25
- [6] Kenneth J Arrow, Amartya Sen, and Kotaro Suzumura. *Handbook of social choice and welfare*, volume 2. Elsevier, 2010. 17, 23, 62, 63
- [7] Reyhan Aydoğan, David Festen, Koen V Hindriks, and Catholijn M Jonker. Alternating offers protocols for multilateral negotiation. In *Modern Approaches to Agent-based Complex Automated Negotiation*, pages 153–167. Springer, 2017. 42, 46, 86, 132
- [8] Reyhan Aydoğan, Koen V Hindriks, and Catholijn M Jonker. Multilateral mediated negotiation protocols with feedback. In *Novel Insights in Agent-based Complex Automated Negotiation*, pages 43–59. Springer, 2014. 50
- [9] Elisabeth Badinter and R Condorcet. Un intellectuel en politique. *Paris, Fayard*, 1988. 26
- [10] Keith Michael Baker. Condorcet : from natural philosophy to social mathematics. 1975. 23, 26
- [11] Flavien Balbo, Nicolas Maudet, and Julien Saunier. Interactions opportunistes par l’écoute flottante. *Actes des Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, 2004 :265–270, 2004. 19
- [12] Martin Beer, Mark D’inverno, Michael Luck, Nick Jennings, Chris Preist, and Michael Schroeder. Negotiation in multi-agent systems. *The Knowledge Engineering Review*, 14(3) :285–289, 1999.
- [13] Jeremy Bentham. *An introduction to the principles of morals and legislation (chapters i–v)*. Wiley Online Library, 1972. 43, 45

- [14] Maurice A Bercoff. *L'art de négocier avec la méthode Harvard*. Editions Eyrolles, 2011. 30
- [15] Elise Bonzon and Nicolas Maudet. On the outcomes of multiparty persuasion. In *International Workshop on Argumentation in Multi-Agent Systems*, pages 86–101. Springer, 2011.
- [16] Steven J Brams and Peter C Fishburn. Going from theory to practice : the mixed success of approval voting. *Social Choice and Welfare*, 25(2-3) :457–474, 2005. 63
- [17] Jean-Pierre Briot and Yves Demazeau. *Principes et architecture des systèmes multi-agents*. Hermès-Lavoisier, 2001.
- [18] Susan Brodt and Leigh Thompson. Negotiating teams : A levels of analysis approach. *Group Dynamics : Theory, Research, and Practice*, 5(3) :208, 2001. 88
- [19] Anthony Chavez and Pattie Maes. Kasbah : An agent marketplace for buying and selling goods. In *Proceedings of the first international conference on the practical application of intelligent agents and multi-agent technology*, volume 31, page 40. London, UK, 1996.
- [20] Konstantinos Christidis and Michael Devetsikiotis. Blockchains and smart contracts for the internet of things. *IEEE Access*, 4 :2292–2303, 2016.
- [21] Pierre Courtois and Tarik Tazdaït. Accord climatique. *Revue économique*, 59(4) :719–735, 2008. 35
- [22] Pierre Courtois and Tarik Tazdaït. Coopération sur le climat : le mécanisme de négociations jointes. *Négociations*, (2) :25–42, 2012. 35
- [23] Sofie De Clercq, Steven Schockaert, Ann Nowé, and Martine De Cock. Multilateral negotiation in boolean games with incomplete information using generalized possibilistic logic. In *IJCAI*, pages 2890–2896, 2015.
- [24] D de Jonge and C Sierra. Nb3 : a multilateral negotiation algorithm for large, non-linear agreement. *Article*, 29. 41, 78
- [25] Ndeye Arame Diago, Samir Aknine, Sarvapali Ramchurn, Onn Shehory, and Mbaye Sène. Distributed negotiation for collective decision-making. In *ICTAI*, 2017.
- [26] Ndeye Arame Diago, Samir Aknine, Onn Shehory, Souhila Arib, Romain Cailliere, and Mbaye Sene. Decentralized and fair multilateral negotiation. In *Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), 2016 IEEE 28th International Conference on*, pages 149–156. IEEE, 2016.
- [27] Frank PM Dignum and Gerard AW Vreeswijk. Towards a testbed for multiparty dialogues. In *Workshop on Agent Communication Languages*, pages 212–230. Springer, 2003.
- [28] Georges Dobias. *Vers la voiture automate : Circulation et sécurité*. Odile Jacob, 2003. 15
- [29] Ulle Endriss. Monotonic concession protocols for multilateral negotiation. In *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 392–399. ACM, 2006. 39, 50
- [30] Peyman Faratin, Carles Sierra, and Nicholas R Jennings. Using similarity criteria to make negotiation trade-offs. In *MultiAgent Systems, 2000*.

- Proceedings. Fourth International Conference on*, pages 119–126. IEEE, 2000. 35, 59
- [31] Peyman Faratin, Carles Sierra, and Nick R Jennings. Negotiation decision functions for autonomous agents. *Robotics and Autonomous Systems*, 24(3-4) :159–182, 1998. 59, 107, 122, 123, 163
  - [32] Alessandro Farinelli, Manuele Bicego, Filippo Bistaffa, and Sarvapali D Ramchurn. A hierarchical clustering approach to large-scale near-optimal coalition formation with quality guarantees. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 59 :170–185, 2017. 99, 107
  - [33] Jacques Ferber. *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. InterEditions, 1997.
  - [34] Katsuhide Fujita, Takayuki Ito, and Mark Klein. An approach to scalable multi-issue negotiation : Decomposing the contract space. 30, 02 2014. 85, 86
  - [35] Katsuhide Fujita, Takayuki Ito, and Mark Klein. Efficient issue-grouping approach for multiple interdependent issues negotiation between exaggator agents. *Decision Support Systems*, 60 :10–17, 2014.
  - [36] Boris Golden and Patrice Perny. Infinite order lorenz dominance for fair multiagent optimization. In *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems : volume 1-Volume 1*, pages 383–390. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010. 74
  - [37] Umberto Grandi, Davide Grossi, and Paolo Turrini. Pre-vote negotiations in binary aggregation. 29
  - [38] Umberto Grandi, Davide Grossi, and Paolo Turrini. Equilibrium refinement through negotiation in binary voting. In *IJCAI*, pages 540–546, 2015.
  - [39] G Granger. *La mathématique sociale du marquis de Condorcet*, Paris 1956. *Google Scholar*. 19, 23, 27, 47
  - [40] Robert H Guttman and Pattie Maes. Agent-mediated integrative negotiation for retail electronic commerce. In *International Workshop on Agent-Mediated Electronic Trading*, pages 70–90. Springer, 1998.
  - [41] Robert H Guttman, Alexandros G Moukas, and Pattie Maes. Agent-mediated electronic commerce : A survey. *The Knowledge Engineering Review*, 13(2) :147–159, 1998.
  - [42] John C Harsanyi. Games with incomplete information played by ‘bayesian’ players, part iii. the basic probability distribution of the game. *Management Science*, 14(7) :486–502, 1968. 34
  - [43] Thomas Haynes and Sandip Sen. Evolving behavioral strategies in predators and prey. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 113–126. Springer, 1995.
  - [44] Noam Hazon, Raz Lin, and Sarit Kraus. How to change a group’s collective decision? In *Proceedings of the Twenty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI ’13*, pages 198–205. AAAI Press, 2013.
  - [45] Miniar Hemaïssia, Amal El Fallah Seghrouchni, Christophe Labreuche, and Juliette Mattioli. A multilateral multi-issue negotiation protocol. In *Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, page 155. ACM, 2007. 84

- [46] Bryan Horling and Victor Lesser. A survey of multi-agent organizational paradigms. *The Knowledge engineering review*, 19(4) :281–316, 2004. 17, 51, 85
- [47] Takayuki Ito, Hiromitsu Hattori, and Mark Klein. Multi-issue negotiation protocol for agents : Exploring nonlinear utility spaces. In *IJCAI*, volume 7, pages 1347–1352, 2007. 84
- [48] Takayuki Ito, Mark Klein, and Hiromitsu Hattori. A multi-issue negotiation protocol among agents with nonlinear utility functions. *Multiagent and Grid Systems*, 4(1) :67–83, 2008.
- [49] Nur Merve BABACI Nassim BISGIN Ozan Erdem HRIZ Mossaab LAFAR Merouane J-P.SANSONNET, AMIL. <https://perso.limsi.fr/jps/enseignement/examsma/2005/2.applications/ApplicationAgents.htm>.
- [50] Nicholas R Jennings, Peyman Faratin, Alessio R Lomuscio, Simon Parsons, Michael J Wooldridge, and Carles Sierra. Automated negotiation : prospects, methods and challenges. *Group Decision and Negotiation*, 10(2) :199–215, 2001. 16, 31, 32, 36
- [51] Nick R Jennings. Commitments and conventions : The foundation of coordination in multi-agent systems. *The knowledge engineering review*, 8(3) :223–250, 1993. 16
- [52] Saint John Walker. Big data : A revolution that will transform how we live, work, and think, 2014. 15
- [53] Mark Klein, Peyman Faratin, Hiroki Sayama, and Yaneer Bar-Yam. Protocols for negotiating complex contracts. *IEEE Intelligent Systems*, 18(6) :32–38, 2003. 50
- [54] Dionysios Kontarinis, Elise Bonzon, Nicolas Maudet, and Pavlos Moraitis. Empirical evaluation of strategies for multiparty argumentative debates. In *International Workshop on Computational Logic and Multi-Agent Systems*, pages 105–122. Springer, 2014.
- [55] Sarit Kraus. Negotiation and cooperation in multi-agent environments. *Artificial intelligence*, 94(1-2) :79–97, 1997. 32
- [56] Sarit Kraus, N NIRKE, and Katia Sycara. Reaching agreements through argumentation. In *Proceedings of the Twelfth International Workshop on Distributed Artificial Intelligence*, pages 233–247, 1993. 36
- [57] Sarit Kraus, Katia Sycara, and Amir Evenchik. Reaching agreements through argumentation : a logical model and implementation. *Artificial Intelligence*, 104(1-2) :1–69, 1998. 36
- [58] Karl Kurbel, Frank Teuteberg, and Daniel Szulim. Xml-based agent communication for electronic marketplaces. *Proceedings (CD) of ISA*, 2000. 15
- [59] Jean-François Laslier. The leader rule : A model of strategic approval voting in a large electorate. *Journal of Theoretical Politics*, 21(1) :113–136, 2009. 63
- [60] Jean-François Laslier and Karine Van der Straeten. Une expérience de vote par assentiment lors de l’élection présidentielle française de 2002. *Revue française de science politique*, 54(1) :99–130, 2004. 63

- [61] Marjorie Le Bars and Jean-Marie Attonaty. A multi-agent system to the common management of a renewable resource : application to water sharing. In *Tools with Artificial Intelligence, Proceedings of the 13th International Conference on*, pages 42–49. IEEE, 2001.
- [62] Yann LeCun, Yoshua Bengio, and Geoffrey Hinton. Deep learning. *nature*, 521(7553) :436, 2015. 15
- [63] Omer Lev and Jeffrey S Rosenschein. Convergence of iterative voting. In *Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 2*, pages 611–618. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2012. 29
- [64] Alessio R Lomuscio, Michael Wooldridge, and Nicholas R Jennings. A classification scheme for negotiation in electronic commerce. *Group Decision and Negotiation*, 12(1) :31–56, 2003. 15
- [65] Nam Tung Ly, Jan Preßler, Dominik Gall, Jörn Hurtienne, and Stephan Huber. Tangible interaction drawers for people with dementia : retrieving living experiences from past memories. In *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing : Adjunct*, pages 157–160. ACM, 2016. 162
- [66] Thomas W Malone and Kevin Crowston. The interdisciplinary study of coordination. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 26(1) :87–119, 1994. 24
- [67] Albert W Marshall, Ingram Olkin, and Barry C Arnold. Inequalities : theory of majorization and its applications. *New York*, 1979.
- [68] Mathieu Martin and Vincent Merlin. Les apports de la théorie du choix social pour l’analyse de la démocratie. 47(2) :53–68, 2004.
- [69] Reshef Meir, Maria Polukarov, Jeffrey S Rosenschein, and Nicholas R Jennings. Convergence to equilibria in plurality voting. In *AAAI*, volume 10, pages 823–828, 2010. 29
- [70] Roger B Myerson and Robert J Weber. A theory of voting equilibria. *American Political Science Review*, 87(1) :102–114, 1993.
- [71] Antoine Nongillard, Philippe Mathieu, Brigitte Jaumard, et al. La négociation du bien-être social utilitaire. *JFSMA*, 8 :55–64, 2008. 45
- [72] Christos H Papadimitriou. *Computational complexity*. John Wiley and Sons Ltd., 2003. 32
- [73] Vilfredo Pareto. *Manuel d’économie politique*. Librairie Droz, 1981. 44
- [74] Simon Parsons, Nicolas Maudet, Pavlos Moraitis, and Iyad Rahwan. Argumentation in multi-agent systems. In *Second International Workshop, ArgMAS*. Springer, 2005.
- [75] Jeremy Pitt, Lloyd Kamara, Marek Sergot, and Alexander Artikis. Voting in multi-agent systems. *The Computer Journal*, 49(2) :156–170, 2006.
- [76] Eric A Posner, Kathryn E Spier, and Adrian Vermeule. Divide and conquer. harvard law school john m. *Olin Center for Law, Economics and Business Discussion Paper Series*, 2009.
- [77] Dean G Pruitt. *Negotiation behavior*. Academic Press, 2013. 34
- [78] Howard Raiffa. *The art and science of negotiation*. Harvard University Press, 1982. 34

- [79] Sarvapali D Ramchurn, Enrico Gerding, Nicholas R Jennings, and Jun Hu. Practical distributed coalition formation via heuristic negotiation in social networks. 2012. 41
- [80] John Rawls. La théorie de la justice comme équité : une théorie politique et non pas métaphysique. In *Individu et justice sociale*, pages 277–318. Le Seuil (programme ReLIRE), 1988.
- [81] John Rawls. Théorie de la justice. 1997. 17, 45, 62, 66
- [82] Fenghui Ren and Minjie Zhang. Bilateral single-issue negotiation model considering nonlinear utility and time constraint. *Decision Support Systems*, 60 :29–38, 2014.
- [83] Jean-Michel Renders. *Algorithmes génétiques et réseaux de neurones*. Hermès, 1994. 15
- [84] Valentin Robu, DJA Somefun, and Johannes A La Poutré. Modeling complex multi-issue negotiations using utility graphs. In *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 280–287. ACM, 2005. 84
- [85] Avi Rosenfeld, Inon Zuckerman, Erel Segal-Halevi, Osnat Drein, and Sarit Kraus. Negochat-a : a chat-based negotiation agent with bounded rationality. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 30(1) :60–81, 2016.
- [86] Jeffrey S Rosenschein and Gilad Zlotkin. *Rules of encounter : designing conventions for automated negotiation among computers*. MIT press, 1994. 32, 50
- [87] Sabyasachi Saha and Sandip Sen. An efficient protocol for negotiation over multiple indivisible resources. In *IJCAI*, volume 7, pages 1494–1499, 2007. 45
- [88] Victor Sanchez-Anguix, Reyhan Aydogan, Vicente Julian, and Catholijn M Jonker. Analysis of intra-team strategies for teams negotiating against competitor, matchers, and conceders. In *The 5th International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations (ACAN 2012)*, pages 1–8, 2012. 88
- [89] Víctor Sánchez-Anguix, Vicente Botti, Vicente Julián, and Ana García-Fornes. Analyzing intra-team strategies for agent-based negotiation teams. In *The 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 3*, pages 929–936, 2011. 106
- [90] Tuomas Sandholm. An implementation of the contract net protocol based on marginal cost calculations. In *AAAI*, volume 93, pages 256–262, 1993. 38
- [91] Tuomas Sandholm. Agents in electronic commerce : Component technologies for automated negotiation and coalition formation. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 3(1) :73–96, 2000.
- [92] Tuomas Sandholm, Kate Larson, Martin Andersson, Onn Shehory, and Fernando Tohmé. Coalition structure generation with worst case guarantees. *Artificial Intelligence*, 111(1-2) :209–238, 1999.
- [93] Tuomas Sandholm, Victor R Lesser, et al. Issues in automated negotiation and electronic commerce : Extending the contract net framework. In *ICMAS*, volume 95, pages 12–14, 1995.

- [94] Tuomas W Sandholm. Distributed rational decision making. *Multiagent systems : a modern approach to distributed artificial intelligence*, pages 201–258, 1999. 32, 37, 39
- [95] Arne Schuldt, Jan Ole Berndt, and Otthein Herzog. The interaction effort in autonomous logistics processes : potential and limitations for cooperation. In *Autonomous Cooperation and Control in Logistics*, pages 77–90. Springer, 2011. 51
- [96] Upendra Shardanand and Pattie Maes. Social information filtering : algorithms for automating “word of mouth”. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 210–217. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1995. 15
- [97] Herbert A Simon, George B Dantzig, Robin Hogarth, Charles R Plott, Howard Raiffa, Thomas C Schelling, Kenneth A Shepsle, Richard Thaler, Amos Tversky, and Sidney Winter. Decision making and problem solving. *Interfaces*, 17(5) :11–31, 1987.
- [98] Reid G Smith. The contract net protocol : High-level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on computers*, (12) :1104–1113, 1980. 38
- [99] LL Thompson and Craig R Fox. Negotiation within and between groups in organizations : Levels of analysis. *Groups at work : Theory and research*, pages 221–266, 2001. 106
- [100] Ante Vilenica, Alexander Pokahr, Lars Braubach, Winfried Lamersdorf, Jan Sudeikat, and Wolfgang Renz. *Coordination in multi-agent systems : A declarative approach using coordination spaces*. na, 2010.
- [101] John Von Neumann and Oskar Morgenstern. *Theory of games and economic behavior (commemorative edition)*. Princeton university press, 2007. 32
- [102] Maya Wardeh, Trevor Bench-Capon, and Frans Coenen. Multi-party argument from experience. In *International Workshop on Argumentation in Multi-Agent Systems*, pages 216–235. Springer, 2009.
- [103] Site web economie.gouv.fr. <https://www.economie.gouv.fr/France-IA-intelligence-artificielle>.
- [104] Site web HAL. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01090234>.
- [105] Site web lemonde.fr. [http://www.lemonde.fr/cop21/article/2015/12/02/climat-des-negociations-a-l-abri-des-regards\\_4821900\\_4527432.html](http://www.lemonde.fr/cop21/article/2015/12/02/climat-des-negociations-a-l-abri-des-regards_4821900_4527432.html). 52
- [106] Site web Selectra. <https://club.selectra.info/>. 86
- [107] Pinata Winoto, Gordon McCalla, and Julita Vassileva. An extended alternating-offers bargaining protocol for automated negotiation in multi-agent systems. In *OTM Confederated International Conferences "On the Move to Meaningful Internet Systems"*, pages 179–194. Springer, 2002.
- [108] Michael Wooldridge. *An introduction to multiagent systems*. John Wiley & Sons, 2009.
- [109] Peter R Wurman, Michael P Wellman, and William E Walsh. The michigan internet auctionbot : A configurable auction server for human and software agents. In *Proceedings of the second international conference on Autonomous agents*, pages 301–308. ACM, 1998. 15

- [110] Ilia Xypolia. Divide et impera : Vertical and horizontal dimensions of british imperialism. *Critique*, 44(3) :221–231, 2016. 51
- [111] LinLan Zhang and Qing Liu. An automated multi-issue negotiation mechanism based on intelligent agents in e-commerce. *Journal of Advanced Management Science Vol*, 4(2), 2016. 84
- [112] Xiaoqin Shelley Zhang and Mark Klein. Hierarchical negotiation model for complex problems with large-number of interdependent issues. In *Proceedings of the The 2012 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology-Volume 02*, pages 126–133. IEEE Computer Society, 2012.
- [113] Xiaoqin Shelley Zhang, Mark Klein, and Ivan Marsa-Maestre. Scalable complex contract negotiation with structured search and agenda management. In *AAAI*, pages 1507–1514, 2014. 40, 85
- [114] Ronghuo Zheng, Nilanjan Chakraborty, Tinglong Dai, and Katia Sycara. Multiagent negotiation on multiple issues with incomplete information. In *Proceedings of the 2013 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, pages 1279–1280. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2013.
- [115] Baohe Zuo, Sue Zheng, and Hong Wu. Multi-issue agent negotiation based on fairness. In *International Conference on Web Information Systems and Mining*, pages 167–176. Springer, 2009.