Mécanisme de négociation multilatérale pour la prise de décision collective

Ndeye Arame DIAGO [1] Samir AKNINE [1] Onn SHEHORY [2] Mbaye SENE [3]

[1] Université de Lyon 1 [2] Bar Ilan University [3] Université de Dakar

aramesdiago@yahoo.fr

Résumé

Dans cet article, nous proposons un modèle de négociation multilatérale dans lequel l'interaction des agents est totalement décentralisée. Le protocole proposé s'inspire du principe "Diviser pour régner". Les agents sont répartis en plusieurs groupes appelés anneaux dans lesquels ils négocient. Nous proposons des politiques d'interaction permettant la communication entre des agents appartenant à des anneaux différents. Nous cherchons à travers cette approche distributive 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, c'est-à-dire que tous les agents négocient dans un seul groupe.

Mots Clef

Négociation multilatérale, Diviser pour régner, Décision collective

Abstract

In this paper, we propose a multilateral negotiation model in which the agents interact in a fully decentralized way. The proposed protocol draws on "divide and rule" approach. The agents are divided into different groups called "rings" in which negotiations take place simultaneously. We propose interaction policies allowing the communication between agents from different rings. We seek through this approach to limit the agents' scope of interaction and hence to reduce agents reasoning complexity to facilitate agreement research. We have evaluated our protocol by comparing it with a model where all of the agents negotiate in the same group.

Keywords

Multilateral negotiation, Divide and rule, Collective decision.

1 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. Ces participants ont le plus souvent un comportement égoïste, et ne partagent pas les informations concernant leurs fonctions d'utilité et leurs préférences. Chacun tente de conduire la négociation vers un accord qui satisfait ses objectifs. Dans un tel contexte, la négociation devient très complexe lorsque le nombre de participants est important. Dans cet article, nous nous intéressons aux négociations multilatérales fondées sur des approches heuristiques[4]. 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 [1].

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 [1]. Par exemple, [5] propose une généralisation du protocole de concession monotone [12] pour la négociation multilatérale, il ne fournit pas un protocole spécifique. [1] propose une généralisation du mécanisme de négociation bilatérale basé sur les offres alternées pour le cas de la négociation multilatérale. D'autres mécanismes de négociation multilatérale désignent un médiateur qui se charge, par exemple, de superviser et de détecter les conflits entre les parties négociatrices, et de suggérer des offres [10, 3]. Le problème de ces protocoles de négociation avec médiateur réside dans leur structure centralisée. Ils ne garantissent pas toujours une solution satisfaisante. 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.

[2] 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, celui-ci démarre toujours la négociation en soumettant une offre, et lorsque son tour arrive, il n'évalue que la dernière offre soumise. Par conséquent, toutes les offres ne sont pas évaluées par tous les agents, et certains d'entre eux peuvent passer à coté des offres qui les auraient intéressées. Dans le protocole AMOP, tous les agents soumettent séquentiellement leurs offres. Ensuite, chacun vote pour toutes les offres. Dans ce protocole, chaque agent a une meilleure visibilité sur l'espace des solutions, et il peut évaluer toutes les offres des autres à la différence du protocole SAOP. Cependant, ce protocole est très coûteux en nombre de messages comparé au protocole SAOP. Le processus de raisonnement des agents devient plus complexe car les agents doivent évaluer toutes les offres en même temps, et prennent des décisions pour chacune de ces offres.
Notre modèle s'appuie sur les hypothèses suivantes : (1) les agents négocient sur un seul problème (attribut) et doivent trouver une solution collective et acceptable, c'est-à-dire, acceptée par la majorité des agents ; (2) les agents sont égoïstes et chacun cherche à défendre ses propres intérêts ; (3) la négociation s'effectue sans médiateur, les agents interagissent entre eux de façon totalement décentralisée ; (4) les agents ne partagent pas leur fonction d'utilité ; (5) la négociation s'effectue sur une durée limitée. De telles négociations nécessitent des protocoles spécifiques pour faciliter la prise de décision et la définition de concepts de solution de négociation équitable et collectivement satisfaisante.
Le mécanisme de négociation que nous proposons, dans cet article, est fondé sur une approche incrémentale et itérative permettant de distribuer la négociation mais aussi, d'appréhender la complexité du raisonnement des agents et ainsi, de faciliter la convergence de la négociation tout en limitant le temps. Pour aborder ces problèmes, nous nous intéressons à l'organisation du système multi-agents. La forme organisationnelle du système peut significativement affecter la complexité de la recherche d'accords, la flexibilité, la réactivité et peut induire des coûts de calcul et de communication [9, 13]. Le modèle de négociation proposé s'inspire de l'approche "Diviser pour régner". Il s'agit, d'abord, de diviser l'ensemble des agents en groupes dans lesquels les négociations vont prendre place. Nous cherchons à travers cette répartition à limiter les champs d'interaction des agents, à réduire la complexité de leur raisonnement et à faciliter la recherche d'accords. Ensuite, nous proposons des politiques d'interaction qui s'adaptent aux modèles d'organisation des agents proposés. Nous proposons différentes stratégies de négociation qui permettent aux agents de prendre des décisions qui répondent au mieux à leurs objectifs.

2 Le modèle de négociation

Pour illustrer le mécanisme de négociation proposé, nous considérons un scénario de négociation basé sur un projet de mise en place d'une nouvelle ligne de tramway pour une agglomération. 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 ayant des intérêts différents vont négocier pour s'accorder sur une solution. Par exemple, le but des maires est d'optimiser le coût de financement du projet et la desserte des établissements publics en préférant que la ligne desserve plusieurs communes. Le préfet s'intéresse à la sécurité des personnes en préférant que certains arrêts soient proches des postes de police. Les conseillers régionaux s'intéressent à la desserte des établissements publics tels que les lycées. Quant aux compagnies de transport, elles souhaitent que les arrêts soient proches des stations de métro et bus pour faciliter les correspondances.
Le mécanisme de négociation proposé consiste à structurer les agents en petits groupes appelés anneaux dans lesquels les agents s'échangent des propositions. La négociation s'effectue simultanément au sein de chaque anneau. Dans chaque anneau, les agents soumettent leurs propositions. Ils reçoivent celles des autres et prennent des décisions. Un agent peut accepter, refuser, renforcer ou attaquer une proposition soumise par un autre agent. La négociation s'effectue de manière décentralisée sans médiation, autrement dit les agents décident eux-mêmes de leurs propositions et réagissent avec les autres selon leurs propres croyances tout en respectant les règles du protocole. 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. Le choix de la règle de la majorité est justifié par le fait que nous considérons les négociations impliquant un grand nombre d'agents dans lesquelles l'application de la règle de l'unanimité rend difficile la recherche d'accords collectifs. Pour rendre flexible le mécanisme de négociation proposé, 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 dans lequel ses intérêts seront mieux défendus. Cependant, ils 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 interactions inter-anneaux et les déplacements des agents d'un anneau à un autre sont régis par les règles du protocole et la politique d'interaction proposée. Une politique d'interaction inter-anneaux spécifie *comment* et *quand* les agents appartenant à des anneaux différents interagissent entre eux.

La négociation s'effectue sur une durée limitée et en plusieurs tours séparés par des points de contrôle. Ces derniers permettent d'évaluer à 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'il existe une solution de négociation dès lors qu'une proposition est acceptée par la majorité des agents. Les points de contrôle s'effectuent à des périodes régulières prédéfinies. En résumé, notre modèle de négociation se déroule en trois phases :

Phase 1 : c'est la répartition initiale des agents dans les anneaux. Elle consiste à définir le nombre d'anneaux à créer et à affecter les agents dans les anneaux.

Phase 2 : c'est la négociation proprement dite. Les agents formulent et soumettent leurs propositions. Ils reçoivent celles des autres et prennent leurs décisions.

Phase 3 : c'est le point de contrôle. Il consiste à vérifier s'il existe, des propositions dont les taux d'acceptations ont atteint le seuil de la majorité fixé par le concepteur du système.

3 Formalisation

Soient $\mathcal{A} = \{a_1, ..., a_n\}$ l'ensemble des agents du système et $\mathcal{G} = \{g_1, ..., g_m\}$ l'ensemble des anneaux dans lesquels les agents sont affectés. Nous désignons par $\{r_1, ..., r_Q\}$ l'ensemble des tours de négociation, par $\{C_{pt_1}, ..., C_{pt_Q}\}$ l'ensemble des points de contrôle. Chaque tour r_q de négociation est suivi d'une phase de contrôle C_{pt_q}. Soient ϕ_{maj} le seuil de majorité et d_l le temps imparti à la négociation.

Chaque agent a_i 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 qu'il reçoit.

Fonction d'utilité et Aspirations : Soit $\mathcal{X} = \{x_1, ..., x_r\}$ 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. 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 la base d'informations incomplètes. Les fonctions d'utilité 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.

Actes de communication : Soit $\mathcal{O} = \{Propose, Accepte, Refuse, Renforce, Attaque\}$ l'ensemble des actes du langage que les agents utilisent pour interagir.

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_α^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_α^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_α^r soumise par $a_r \in \mathcal{A}g_k$ et envoie un message à tout $a_j \in \mathcal{A}g_k$.

Attaque$(a_i, \mathcal{A}g_k, p_\alpha^r, argp_\alpha^{r-})$: l'agent $a_i \in \mathcal{A}$ attaque la proposition p_α^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$(a_i, \mathcal{A}g_k, p_\alpha^r, argp_\alpha^{r+})$: l'agent $a_i \in \mathcal{A}$ renforce la proposition p_α^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_α^i signifie que la proposition p_α est soumise par a_i. Chaque proposition p_α 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 plus loin et l'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. Les autres taux tels que le taux de renforcement, d'attaque, et de refus sont calculés de la même façon. Les agents formulent des arguments positifs ou négatifs pour respectivement renforcer ou attaquer les propositions. Les renforcements et les attaques sont pris en compte dans l'évaluation de la valeur de support d'une proposition.

4 Mécanisme de négociation

4.1 Répartition des agents en anneaux

La répartition de $\mathcal{A} = \{a_1, ..., a_n\}$ en plusieurs groupes $\mathcal{G} = \{g_1, ..., g_m\}$ s'effectue en deux étapes : (1) le choix du nombre de groupes ; (2) l'affectation des agents dans les groupes. 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. L'affectation des agents dans les anneaux s'effectue telle que : $\bigcap_{k\geq 1}^{m} \mathcal{A}g_k = \emptyset, \bigcup_{k\geq 1}^{m} \mathcal{A}g_k = \mathcal{A}, |\mathcal{A}g_k| \geq 2$.

4.2 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. Chaque agent a_i définit sa zone d'accord possible, désignée ici par l'intervalle $[U_{min_{a_i}}, U_{max_{a_i}}]$, c'est-à-dire l'intervalle de valeurs d'utilité acceptables. Au début de la négociation, 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 cours de la négociation si l'agent n'atteint pas son premier objectif ($U_{max_{a_i}}$) au bout d'un certain temps, 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 d'avancement de ses négociations. La question qui se pose est : *à quel moment, et sous quelles conditions, l'agent va diminuer sa valeur d'utilité maximale $U_{max_{a_i}}$ espérée et de combien ?.*

Tactiques de mise-à-jour des aspirations. Nous considérons ici, que la révision à la baisse des aspirations d'un agent dépend des facteurs tels que le temps et le résultat qu'il obtient à cet instant, c'est-à-dire le nombre d'acceptations obtenues par la proposition qu'il supporte. Une proposition supportée par un agent, peut être celle qu'il a soumise ou celle qu'il a acceptée. Nous définissons des tactiques permettant à chaque agent a_i de calculer à chaque tour r_q, une nouvelle valeur d'utilité $U^q_{max_{a_i}}$ qu'il espère avoir. Cette valeur est telle que $U_{min_{a_i}} \leq U^q_{max_{a_i}} \leq U_{max_{a_i}}$. 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), n'a aucune chance d'être acceptée par au moins la majorité des agents, lorsque le temps imparti à la négociation sera atteint. La tactique d'un agent a_i dépend de la façon dont il estime l'évolution du taux d'acceptation d'une proposition qui peut avoir la chance d'atteindre au moins le seuil de la majorité ϕ_{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 en fonction du temps t tel que : $0 \leq \alpha^p(t) \leq 1$, $0 \leq t \leq d_l$. La fonction α^p est continue et croissante. Elle peut être définie de différentes façons, représentant chacune une tactique de négociation [7, 6]. α^p 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 $\mathcal{T}^{ac}_{p_c(i)}$ de sa proposition courante à cette même date t_q. Ainsi, l'agent décidera de réviser à la baisse ou non ses aspirations.

La fonction α^p guide 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, et donc d'accepter ou de soumettre de nouvelles propositions. Dans ce mécanisme de négociation, nous considérons un exemple de définition de α^p telle que : $\alpha^p(t) = \frac{\phi_{maj}}{d_l} \times t$. α^p est une fonction linéaire, croissante et continue. Ici nous considérons que les temps des phases de contrôles 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 va les réduire. Le calcul de la nouvelle valeur d'utilité $U^q_{max_{a_i}}$ au tour r_q dépend de l'écart entre le taux d'acceptation de sa proposition courante $\mathcal{T}^{ac}_{p_c(i)}$, et du taux $\alpha^p(t_q)$ qu'il estimait avoir pour espérer que sa proposition atteigne au moins à la fin de la négociation le seuil de majorité ϕ_{maj}. L'équation 4.2 ci-dessous montre comment $U^q_{max_{a_i}}$ est évaluée.

- si $\alpha^p(t_q) > \mathcal{T}^{ac}_{p_c(i)}$ alors l'agent met à jour ses aspirations et $U^q_{max_{a_i}} = U_{min_{a_i}} + (U^{q-1}_{max_{a_i}} - U_{min_{a_i}}) \times (1 - (\alpha^p(t_q) - \mathcal{T}^{ac}_{p_c(i)}))$.
- si $\alpha^p(t_q) < \mathcal{T}^{ac}_{p_c(i)}$ alors l'agent maintient ses aspirations et $U^q_{max_{a_i}} = U^{q-1}_{max_{a_i}}$.

$U^{q-1}_{max_{a_i}}$ 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, $U^1_{max_{a_i}} = U_{max_{a_i}}$. Au tour r_q, $U^q_{max_{a_i}}$ est recalculée que si $\alpha^p(t_q) > \mathcal{T}^{ac}_{p_c(i)}$. Sinon l'agent maintient la précédente valeur. Par souci de simplification, nous considérons dans cet article que les agents utilisent la même fonction d'estimation (fonction linéaire) mais chaque agent a_i définit ses seuils 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, chaque agent peut chacun définir sa propre fonction d'estimation en se basant par exemple, sur ses propres croyances.

Dans cet article, nous nous sommes limités à un exemple de définition simple de α^p où nous n'avons considéré que trois paramètres : le seuil de la majorité ϕ_{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 α^p peuvent être mises en œuvre dans d'autres contextes prenant en compte d'autres paramètres relevant de croyances propres à chaque agent.

La prise de décision. Un agent prend des décisions en fonction de ses aspirations $[U_{min_{a_i}}, U_{max_{a_i}}]$ qu'il met à jour à chaque tour r_q de la négociation, et aussi en fonction de certaines règles d'interaction détaillées plus loin.

◊ *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 $p_c(j) = p_i$. Nous distinguons deux situations avec des niveaux d'acceptation différents :

- Si $u_{a_j}(p_i) > U_{max_{a_j}}$, 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 $U^q_{max_{a_i}} \leq u_{a_j}(p_i) \leq U_{max_{a_j}}$ il s'agit d'une acceptation sans argument de renforcement car cette proposition est admise par concession.

Régle 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 $u_{a_j}(p_i) < u^q_{max_{a_j}}$. 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.

Régle 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 $U^q_{max_{a_i}} \leq u_{a_i}(p_i) \leq U^{q-1}_{max_{a_i}}$ au tour r_q de la négociation à l'instant δ_t, si le taux d'acceptation $\mathcal{T}^{ac}_{p_c(i)}$ 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 $\alpha^p(\delta_t)$.

Négociation au sein d'un groupe. 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, soit la refuser, soit la renforcer, soit l'attaquer. Les agents interagissent selon les règles du protocole définies comme suit :

$\mathbf{R}_{i1}$ **:** chaque agent peut soumettre un nombre limité de propositions δ_p et peut faire un nombre limité de refus δ_r au cours de la négociation.

$\mathbf{R}_{i2}$ **:** chaque agent ne peut soumettre ses propositions qu'aux membres de son anneau à tout moment de la négociation.

$\mathbf{R}_{i3}$ **:** chaque agent peut accepter une proposition faite par un autre agent à n'importe quel moment de la négociation.

$\mathbf{R}_{i4}$ **:** une proposition ne peut être acceptée, refusée, attaquée ou renforcée plusieurs fois par le même agent.

Ces règles permettent de gérer les interactions entre les agents durant la négociation en les rendant plus cohérentes. Elles permettent aussi de limiter les taux de messages et de traitements. 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.

Les politiques d'interaction inter-anneaux. Nous proposons la politique, FIC*(Free Inter-rings Communication)*, qui permet la communication libre et réglementée entre les agents appartenant à des anneaux différents. 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 atteignent 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.

$\mathbf{R}_{m1}$ **:** un agent a_i ne peut visiter plus de δ_v fois le même anneau pendant toute la négociation.

$\mathbf{R}_{m2}$ **:** un agent a_i ne peut effectuer plus de δ_d déplacements pendant toute la négociation.

Chaque agent qui décide de changer d'anneau, doit identifier l'anneau dans lequel ses intérêts seront mieux défendus. La politique d'interaction FIC augmente la flexibilité de communication entre agents dans différents anneaux. 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 traitement d'informations dans le cas où ils sont tous réunis dans un seul groupe.

Migrations des agents. Compte tenu des règles de mobilité présentées ci-dessus, un agent a besoin de déterminer le moment où il doit changer d'anneau et quel anneau il doit rejoindre. Cela consiste à identifier d'abord l'anneau dans lequel ses propositions seront mieux défendues, et ensuite de rejoindre cet anneau. Les désaccords, dans un anneau, offrent la possibilité à un agent en dehors de cet anneau de présenter une proposition qui peut satisfaire au mieux les objectifs des agents de cet anneau. Nous considérons ici, qu'un anneau est faible à l'instant δ_t de la négociation lorsque toutes les propositions soumises dans cet anneau ont des taux d'acceptation qui sont inférieurs à un certain seuil $\varphi_{weak} = \alpha^p(\delta_t)$. Chaque agent évalue les anneaux qu'il écoute selon les critères suivants : (1) le nombre d'agents dans l'anneau, car l'agent vise à convaincre autant d'agents que possible ; (2) l'écart entre les taux d'acceptation des propositions soumises dans l'anneau et ceux de l'agent souhaitant se déplacer dans cet anneau. Ces critères permettent à l'agent d'évaluer son degré d'influence dans l'anneau qu'il souhaite rejoindre et les chances que ses propositions soient acceptées. Le choix de l'anneau à rejoindre est non-trivial lorsque l'agent écoute plusieurs anneaux en même temps. Chaque agent associe un vecteur d'utilité à chaque anneau écouté selon les critères ci-dessus. Ainsi, *la dominance de Lorenz* [8] est utilisée pour comparer les vecteurs d'utilité des anneaux écoutés par un agent. Cela permet à chaque agent d'établir un ordre de préférence totale sur l'ensemble des anneaux écoutés.

Les points de contrôle. Soit $\mathcal{C}_{pt} = \{C_{pt_1}, ..., C_{pt_q}\}$ l'ensemble des points de contrôle prévus. Chaque point de contrôle C_{pt_r} est représenté par un tuple (t_r, S_r), t_r est la date, S_r est l'ensemble des propositions acceptables.$\mathcal{C}_{pt} = \{C_{pt_1} = (t_1, S_1), ..., C_{pt_q} = (t_q, S_q)\}$ avec$(t_1 <, ..., t_q < d_l)$.
Lorsqu'un point de contrôle C_{pt_r} s'effectue, chaque agent $a_i \in \mathcal{A}$ communique ses propositions qui ont atteint le seuil de la majorité.

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 au prochain point de contrôle $C_{pt_{r+1}}$. 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 y a plusieurs propositions acceptables comme solution. Le processus de décision social présenté dans section 4.3 est utilisé pour sélectionner la proposition qui sera retenue comme solution finale.

4.3 Concept de solution équitable et juste

Le degré de satisfaction des agents. La satisfaction d' un agent a_i pour une proposition p 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 p. Le score exprime le degré de satisfaction d'un agent a_i que nous évaluons à trois niveaux : –1 lorsque p est audelà de l'objectif fixé, $u_{a_i}(p) \geq U_{max_{a_i}}$; –2 lorsque p est dans la zone de concessions, $u_{a_i}(p) \in [U_{min_{a_i}}, U_{max_{a_i}}]$; –3 lorsque la proposition p sera refusée, c'est-à-dire,$u_{a_i}(p) < U_{min_{a_i}}$ ou $u_{a_i}(p) \in [U_{min_{a_i}}, U^q_{max_{a_i}}]$. 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 puisque chaque agent définit sa propre fonction d'utilité. Par conséquent, deux agents ayant la même valeur d'utilité pour une proposition peuvent avoir des degrés de satisfaction différents. Pour évaluer le résultat de la négociation, nous définissons une nouvelle méthode d'évaluation du bien-être social différente de celles utilisant directement les valeurs d'utilité des agents. Par exemple, les fonctions de bien-être sociale de Nash ou utilitariste effectuent respectivement le produit et la somme des utilités individuelles des agents.

La satisfaction sociale d'une proposition. 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 réelle positive à chaque proposition soumise désignant sa valeur de satisfaction sociale. La définition de w_s s'inspire du principe de Rawls (*maximim*) [11] indiquant que le bien-être social d'une allocation dépend du bien-être de l'individu qui a le niveau de satisfaction le plus bas, c'est-à-dire la personne avec l'utilité minimale. Dans notre mécanisme, la fonction w_s est définie comme suit : $w_s(p_\alpha) = \frac{\sum \sigma_{a_i}}{n-n_{ap_\alpha}}$. n est le nombre d'agents du système, n_{ap_α} désigne le nombre d'agents qui ont accepté la proposition p_α sans prendre en compte l'agent ayant soumis la proposition. Nous avons donc $n_{ap_\alpha} \leq n-1$. σ_{a_i} est la valeur de score de chaque agent a_i. w_s garantit le choix de la proposition respectant à la fois la règle de la majorité et celle de l'équité selon Rawls. Ainsi, maximiser w_s consiste à minimiser le nombre d'agents ayant une satisfaction nulle, c'est-à-dire, les agents ayant refusé la proposition.

Proposition 3 *La proposition ayant la plus grande valeur de satisfaction sociale a aussi le taux d'acceptation le plus élevé lorsque σ_1 et σ_2 prennent certaines valeurs (voir preuve).*

Preuve Soit $f, g, f(k) = \frac{(k+1)\sigma_1}{n-k}$, $g(k) = \frac{(k+1)\sigma_2}{n-k}$ deux fonctions, $k \in [1, n-1]$ and $\mathcal{P}_k$ est l'ensemble des propositions avec un nombre k 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 **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_α 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_β qui a $k+1$ acceptations alors quelles que soient les valeurs de satisfaction des agents pour p_α, $w_s(p_\beta) > w_s(p_\alpha)$, nous avons donc $f(k) \leq w_s(p_\alpha) \leq g(k) < f(k+1) \leq w_s(p_\beta) \leq g(k+1)$.

La fonction de satisfaction sociale w_s permet de classer toutes les propositions dont les taux d'acceptation sont supérieurs ou égaux à ϕ_{maj}. La proposition qui a la plus grande valeur de satisfaction sociale devient la solution. Nous avons montré que si cette proposition existe, elle a aussi le plus grand taux d'acceptation. Notons que pour obtenir ce résultat, les valeurs de σ_1 et σ_2 doivent respecter une certaine contrainte telle que : $\sigma_1 \in]M, \sigma_2[$. Les résultats de ce travail nous ont permis aussi d'identifier certaines 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. Il peut arriver que plusieurs propositions obtiennent la même valeur de satisfaction. Ainsi pour garantir l'unicité de la solution de négociation, nous utilisons les valeurs de support des propositions dont les valeurs de satisfaction sont égales pour désigner la proposition gagnante. S'il existe encore des ex aequo leurs estampilles sont utilisées. Il existe toujours un écart de temps ϵ entre les dates d'obtention de la majorité pour deux propositions.

5 Résultats empiriques

Nous avons implémenté en Java le protocole proposé. Les simulations sont réalisées en faisant varier le nombre d'agents et le nombre d'anneaux. Le scénario de négociation se base sur l'exemple du projet de tramway. Une liste de propositions et un ensemble de critères d'évaluation sont prédéfinis. Chaque agent sélectionne aléatoirement un sous-ensemble de propositions et un sous-ensemble de critères. Nous avons effectué plusieurs expériences, dans le cas où les agents forment un seul anneau et dans le cas où les agents forment plusieurs anneaux. Pour chaque expérience, nous avons mesuré le taux de convergence. Ce 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. La figure 1 montre que le nombre d'anneaux

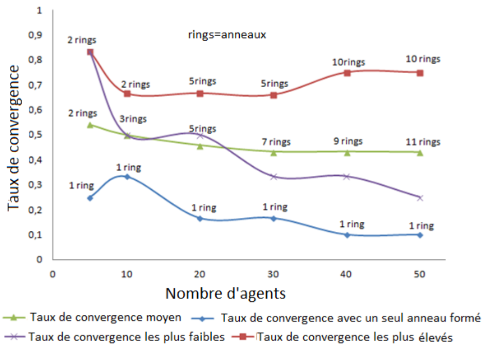

Figure 1 – Convergence de la négociation selon le nombre d'anneaux formés

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 qu'un seul anneau formé. La courbe coloriée 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 $\lfloor n/2 \rfloor$. Les courbes de la figure 2 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

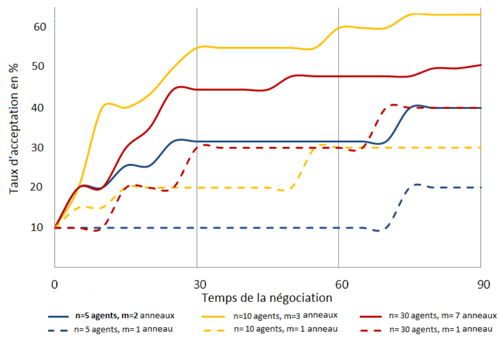

Figure 2 – Acceptation moyenne des propositions soumises en fonction du temps.

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.

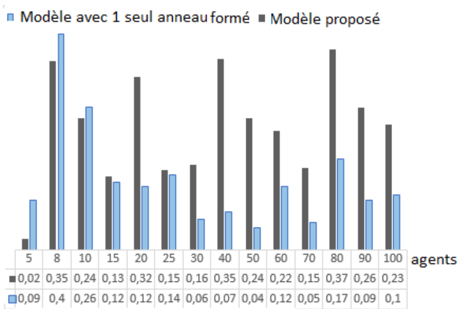

Figure 3 – Qualité de la solution de négociation

La figure 3 montre la comparaison entre notre modèle de négociation distribuée et le modèle centralisé (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. Nous observons que les solutions obtenues lorsque le nombre d'agents augmente sont meilleures dans notre modèle que dans le modèle centralisé.

6 Conclusion

Cet article a présenté un modèle de négociation multilatérale dans lequel les agents interagissent de façon incrémentale et itérative. Les agents sont répartis en plusieurs groupes (anneaux) dans lesquels ils mènent leurs négociations. L'objectif de ce travail est de faciliter la recherche d'accords. Nous avons évalué les performances de notre mécanisme de négociation en utilisant un scénario de négociation. Les résultats empiriques montrent que ce modèle de négociation fondé sur une approche distributive permet aux agents de négocier plus facilement comparé aux modèles dans lesquels tous les agents sont dans un seul groupe. Dans nos futurs travaux, nous testerons ce mécanisme avec d'autres exemples de négociation pour montrer d'autres propriétés.

Références

[1] B. An, N. Gatti, and V. Lesser. Alternating-offers bargaining in one-to-many and many-to-many settings. *AMAI*, 77(1-2) :67–103, 2016.

[2] R. Aydoğan, D. Festen, K. V. Hindriks, and C. M. Jonker. Alternating offers protocols for multilateral negotiation. In *Modern Approaches to ACAN*, pages 153–167. Springer, 2017.

[3] R. Aydoğan, K. V. Hindriks, and C. M. Jonker. Multilateral mediated negotiation protocols with feedback. In *Novel Insights in ACAN*, pages 43–59. Springer, 2014.

[4] D. De Jonge and C. Sierra. Nb3 : a multilateral negotiation algorithm for large, non-linear agreement spaces with limited time. *AAMAS*, 29(5) :896–942, 2015.

[5] U. Endriss. Monotonic concession protocols for multilateral negotiation. In *AAMAS*, pages 392–399. ACM, 2006.

[6] P. Faratin, C. Sierra, and N. R. Jennings. Negotiation decision functions for autonomous agents. *RAS*, 24(3-4) :159–182, 1998.

[7] P. Faratin, C. Sierra, and N. R. Jennings. Using similarity criteria to make negotiation trade-offs. In *ICMAS*, pages 119–126. IEEE, 2000.

[8] B. Golden and P. Perny. Infinite order lorenz dominance for fair multiagent optimization. In *AAMAS*, pages 383–390, 2010.

[9] B. Horling and V. Lesser. A survey of multiagent organizational paradigms. *The Knowledge engineering review*, 19(4) :281–316, 2004.

[10] M. Klein, P. Faratin, H. Sayama, and Y. Bar-Yam. Protocols for negotiating complex contracts. *IEEE Intelligent Systems*, 18(6) :32–38, 2003.

[11] J. Rawls. Théorie de la justice. 1997.

[12] J. S. Rosenschein and G. Zlotkin. *Rules of encounter : designing conventions for automated negotiation among computers*. MIT press, 1994.

[13] A. Schuldt, J. O. Berndt, and O. Herzog. The interaction effort in autonomous logistics processes : potential and limitations for cooperation. In *ACCL*, pages 77–90. 2011.