

# Structures de coopération

## 2.1 Introduction

Dans [Conte et Castelfranchi, 1992], deux classes d'approches sont identifiées en ce qui concerne la modélisation des interactions sociales dans les SMA.

Tout d'abord par le bas, ou *bottom-up* : les agents n'ont pas *a priori* de but commun, les interactions sociales dérivent des efforts que chacun déploie pour atteindre ses buts. Aucune structure sociale n'existe *a priori* mais elle émerge des interactions entre les agents et de la manière dont ils en tiennent compte pour atteindre leurs buts *malgré* ou *avec* les autres. D'après la définition du chapitre 1 les agents *coopèrent*. Il est classique [Sichman, 1998] d'appeler *coalitions* les structures sociales créées dynamiquement par les agents dans une approche *bottom-up*. Deux grandes classes de formation de coalition existent :

1. les approches fondées sur l'utilité, dans lesquelles chaque agent cherche à maximiser ses « gains ». La présence d'autres agents *limite* souvent les possibilités de chaque individu, et les agents développent donc des conventions et des contraintes qui leur permettent de rendre cohérent le comportement de l'ensemble afin de minimiser les pertes individuelles.
2. les approches fondées sur la complémentarité ont un point de vue inverse, postulant que les agents ont des capacités complémentaires qui peuvent leur permettre d'atteindre leurs objectifs individuels. Ainsi,

la présence des autres agents *augmente* les capacités de chacun à atteindre ses buts.

Ces deux classes d'approche ne se distinguent finalement que par le point de vue qu'elles donnent d'un même problème qui est pour chaque agent de se rapprocher au mieux de ses buts en tenant compte des autres.

Ensuite, par le haut, ou *top-down* : on considère que les agents qui composent le SMA ont une tâche collective à accomplir, un but commun, il y a donc *collaboration* entre les agents *par nature*, ils sont conçus pour cela. Généralement ils disposent de structures de collaboration pré-établies qui guident leurs interactions dans l'accomplissement de leur tâche.

## 2.2 Formation de coalition fondée sur l'utilité

Les approches pour la formation de coalition fondée sur l'utilité suivent le principe *bellum omnium contra omnes*, les agents ne coopèrent les uns avec les autres qu'avec le but de maximiser leur propre utilité, qui peut représenter, selon les applications, de l'argent, du temps, du carburant, *etc.* De manière générale, ces approches sont fondées sur la *théorie des jeux*, qui fournit des outils pour permettre aux agents de décider avec qui coopérer, mais également des critères formels par exemple pour déterminer la stabilité d'une éventuelle coalition.

### 2.2.1 Formalisation

La manière la plus classique de formaliser le problème de la formation de coalition suivant la théorie des jeux est la suivante : le problème se compose d'un ensemble d'agents  $\Gamma$  dont tout sous-ensemble est appelé coalition, et d'une fonction  $\nu$  qui associe à toute coalition de  $\Gamma$  sa valeur, c'est-à-dire le gain total espéré pour cette coalition (le plus souvent sous forme monétaire). Les membres d'une coalition sont considérés comme liés par un contrat de redistribution de la valeur de la coalition entre ses membres. On fait généralement l'hypothèse que la valeur d'une coalition ne dépend pas des agents n'en faisant pas partie et qu'il ne peut y avoir de redistribution à l'extérieur de la coalition. Enfin, la fonction  $\nu$  est supposée connue par tous.

La solution d'un tel problème est une *partition* de  $\Gamma$  associée à l'utilité espérée par chaque agent, calculée à partir de la part qu'il reçoit sur la valeur totale de sa coalition (selon le contrat de redistribution). On pourra se référer à [Kahan et Rapoport, 1984] ou [Shehory et Kraus, 1995] pour une formalisation plus détaillée que ce que nous proposons ici.

Il y a en réalité *deux* problèmes à résoudre :

1. Comment choisir le mode de redistribution de la valeur des coalitions entre leurs membres et comment coopérer au sein de ces coalitions ?
2. Quelles coalitions former ?

### 2.2.2 Rationalité individuelle et collective

La notion de rationalité individuelle est généralement tenue pour acquise dans un problème de formation de coalition. Elle représente le fait qu'un agent ne décide de se joindre à une coalition que si son utilité espérée au sein de cette coalition est supérieure à celle qu'il obtiendrait en restant seul. On parle alors souvent d'agent *égoïste* ou *libre* [Vauvert et El Fallah-Seghrouchni, 2000].

On peut étendre la notion de rationalité aux coalitions [Shehory et Kraus, 1995]. Une coalition rationnelle n'accepte qu'un agent se joigne à elle que si sa valeur s'en trouve augmentée. Tous les environnements n'ont pas cette propriété, on peut très bien imaginer une situation dans laquelle un agent est ajouté à une coalition uniquement à son profit et à celui d'un autre membre très « influent » dans cette coalition, sans que cela soit profitable au groupe. Dans ce cas, certains membres perdent au change, mais leur situation ne serait pas nécessairement meilleure en dehors de la coalition.

### 2.2.3 Additivité

Certaines propriétés du problème (qui s'expriment dans la fonction  $\nu$ ) peuvent avoir une influence déterminante sur la forme des coalitions, quels que soient les processus de décision des agents. Ainsi, un des paramètres les plus classiques d'un problème de formation de coalition est son « additivité », *i.e.* y a-t-il toujours plus à gagner en travaillant ensemble ? On parle de super-additivité lorsque :  $\nu(C_1 \cup C_2) > \nu(C_1) + \nu(C_2)$  pour toutes coalitions disjointes  $C_1$  et  $C_2$ . Le second problème (quelles coalitions former) ne

se pose alors pas pour des agents individuellement rationnels qui formeront nécessairement une seule coalition comprenant tous les agents. Reste alors à déterminer le mécanisme de redistribution de la valeur entre les membres. La solution la plus classique, considérée comme la plus « équitable », et qui sert souvent de référence pour en évaluer d'autres est la valeur de Shapley [Shapley, 1953].

On considère un problème de formation de coalition comme sous-additif<sup>1</sup> s'il existe deux coalitions disjointes  $C_1$  et  $C_2$ , telles que  $\nu(C_1 \cup C_2) < \nu(C_1) + \nu(C_2)$ . Le problème de savoir quelle coalition former se pose alors.

#### 2.2.4 Stabilité

L'objectif d'un mécanisme de formation de coalition est de former des coalitions *stables*. La question de la stabilité peut être formulée du point de vue individuel ou collectif et être évaluée selon des critères directement issus de la théorie des jeux. La valeur de Shapley (*cf.* paragraphe précédent) en est un bon exemple, mais elle ne s'applique qu'au cas super-additif, tout comme d'autres tels le *core*, le *bargaining set* ou le *kernel* [Kahan et Rapoport, 1984]. Le critère individuel principal de stabilité est la rationalité individuelle : chaque agent d'une coalition doit obtenir une utilité au moins égale à celle qu'il recevrait en étant seul. Une telle situation correspond à ce qu'on appelle un équilibre de Nash [Nash, 1951] *i.e.* une situation dans laquelle aucun agent n'a intérêt à dévier unilatéralement de sa position (ici, son appartenance ou non à une coalition).

D'un point de vue collectif, le concept d'*optimum de Pareto* [Pareto, 1896] est plus adapté : on considère qu'une configuration  $A$  (de manière générale une distribution de coalitions associées à leurs fonctions de répartition) *Pareto-domine* une autre configuration  $B$  si et seulement si tous les agents ont une utilité dans la configuration  $A$  au moins égale à celle qu'ils ont dans la configuration  $B$  et si au moins un agent a dans  $A$  une utilité *strictement* supérieure à celle qu'il obtient dans  $B$ . On parle d'optimum de Pareto pour une configuration qui n'est Pareto-dominée par aucune autre, c'est vers cet objectif que tend un mécanisme de formation de coalition « collectivement rationnel ».

---

<sup>1</sup>Il faudrait plutôt parler d'environnement : un environnement est sous-additif ou super-additif si *tous* les problèmes de formation de coalition qu'il admet le sont, et un environnement est général s'il admet un problème sous-additif [Klusch et Gerber, 2002].

### 2.2.5 Négociation

Les critères issus de la théorie des jeux nous donnent de précieux moyens de caractérisation des solutions possibles à un problème de formation de coalition. En revanche ils ne nous fournissent aucun indice sur la manière dont les agents peuvent procéder pour atteindre ces solutions. En effet ces critères ne sont calculables que si l'on dispose de toutes les informations concernant les préférences des agents (fonctions d'utilité individuelles, ressources...) Or il n'est généralement pas possible d'obtenir une telle situation de connaissance *totale* dans un système multiagent en raison notamment des difficultés liées aux communications (voir chapitre 3).

Ainsi, on a souvent recours à un processus incrémental de formation de coalition fondé sur la négociation entre agents. Les agents susceptibles de former une coalition communiquent selon certains protocoles, ils expriment leurs besoins, font des concessions, jusqu'à obtenir une solution agréable à tous. Par exemple, dans [Soh et Tsatsoulis, 2002b], l'agent qui est à l'origine du processus de formation de coalition sélectionne *à la hâte* un ensemble d'agents qui sont des *voisins*, puis affine le processus en conduisant en parallèle des négociations avec chaque membre potentiel dans un processus d'argumentation au cours duquel contraintes et engagements sont échangés. Pour finir, l'initiateur scelle le statut de la coalition par un engagement. De nombreuses autres approches de la formation de coalition par négociation existent [Sandholm et Lesser, 1995], souvent liées à des applications de type commercial [Sandholm, 2000] avec des agents purement égoïstes, mais la formation de coalition peut aller d'un bout à l'autre du spectre agents égoïstes – résolution distribuée de problème [Zhang *et al.*, 2002].

## 2.3 Réseaux de dépendance sociale

Puissance et dépendance sociales jouent un rôle important en théorie des jeux [Harsanyi, 1962] et en sociologie [Coleman, 1973] où elles représentent l'influence que peut avoir un individu sur le comportement d'un autre. Les notions de puissance et de dépendance sociales ont également été introduites dans le domaine des SMA [Castelfranchi, 1990]. Un réseau de dépendance sociale représente les relations de dépendance au sein d'un groupe d'agents. Pour résumer : un agent *A* dépend d'un autre agent *B* s'il a besoin de *B* pour accomplir ses buts (ou du moins une partie de ses buts),

et inversement on dira que  $B$  a du pouvoir sur  $A$ . La connaissance de ces relations par un agent délibératif fait partie des modèles dont il dispose et doit lui permettre de raisonner à propos des autres agents afin de se rapprocher de ses propres buts en fonction de ce qu'il connaît des autres. Différentes manières de représenter et d'utiliser ces relations de dépendance ont été proposées [Skvoretz et Willer, 1993], nous présentons ici celle de Sichman *et al.*, fondée sur le modèle de [Castelfranchi *et al.*, 1992].

### 2.3.1 a-, r- et s-dépendance

Un tel mécanisme de raisonnement social a été proposé dans [Sichman *et al.*, 1994]. Il repose sur les *descriptions externes* qu'ont les agents les uns des autres. Pour chaque agent, sa description externe est composée des éléments suivants :

**buts** : les buts que l'agent désire atteindre ;

**actions** : les actions dont est capable l'agent ;

**ressources** : les ressources dont l'agent a le contrôle ;

**plans** : les plans (enchaînement d'actions) dont dispose l'agent pour atteindre ses buts.

Étant donné ces descriptions externes, un agent peut déterminer son autonomie par rapport aux autres agents. Trois types d'autonomie sont définis par rapport à un ensemble de plans donné :

**a-autonomie** : autonomie d'action, l'ensemble de plans ne contient aucune action devant être exécutée par un autre agent ;

**r-autonomie** : autonomie de ressources, l'ensemble de plans ne nécessite aucune ressource contrôlée par un autre agent ;

**s-autonomie** : conjonction de a-autonomie et r-autonomie.

À l'inverse, on peut parler de *a-dépendance* si un agent dépend de l'action d'un autre, de *r-dépendance* s'il a besoin d'une ressource contrôlée par un autre, et enfin de *s-dépendance* dans l'un ou l'autre cas. C'est à partir de ces notions qu'un agent se construit un réseau de dépendance par rapport à un but donné, il détermine non seulement ses propres relations de dépendance, mais aussi celles des autres agents. Une fois ce réseau construit, un agent peut déterminer quelle est sa situation de dépendance envers un agent donné par rapport à un but donné. Cette dépendance peut être

simple, mais aussi *mutuelle* si des agents dépendent les uns des autres pour atteindre un même but, ou encore *réciproque* si deux agents dépendent chacun l'un de l'autre mais pour des buts différents.

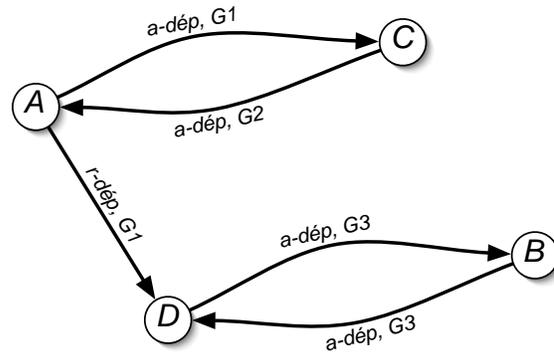


FIG. 2.1 – Exemple de réseau de dépendance. Il y a a-dépendance réciproque entre les agents *A* et *C* pour les buts *G1* et *G2*, a-dépendance mutuelle entre *B* et *D* pour le but *G3* et r-dépendance simple de *A* envers *D* pour le but *G1*.

### 2.3.2 Obtention et utilisation

Il faut noter que le réseau de dépendance est construit en fonction d'informations (de plans) provenant de l'agent lui-même, mais aussi des autres agents (par le biais de communications ou de perceptions), les dépendances calculées sont donc des croyances. Dans [Sichman et Demazeau, 1995], les auteurs proposent un mécanisme qui permet aux agents de détecter les incohérences qui peuvent apparaître lorsqu'un agent a des croyances erronées sur ses relations de dépendance.

Un réseau de dépendance permet donc à un agent de savoir de qui il dépend et qui dépend de lui, il peut alors utiliser cette connaissance pour décider de ses actions. Dans le cas d'agents purement égoïstes, seule l'information « de qui dépends-je ? » est en général utilisée, mais dans des SMA collaboratifs les deux types d'informations seront utilisés.

Malgré l'existence de mécanismes permettant de détecter les incohérences, ce genre de mécanisme de construction et de raisonnement sur des

réseaux de dépendance sociale est très dépendant des informations (les descriptions externes) dont disposent les agents les uns sur les autres.

## 2.4 Travail d'équipe

Si l'on parle surtout de *coalition* pour les approches *bottom-up* dans lesquelles les agents coopèrent de manière plus ou moins improvisée (ou négociée) pour atteindre des objectifs avant tout individuels, le maître-mot dans les approches *top-down* est *équipe*. Alors qu'une coalition est un groupe d'agents assemblés ponctuellement pour mettre en commun leurs ressources car leurs intérêts convergent, dans une équipe au contraire, les agents sont rassemblés dès le départ dans un but précis et de manière à ce que leurs capacités se complètent pour l'accomplissement de la tâche de l'équipe, sans qu'ils aient nécessairement d'objectif individuel.

### 2.4.1 Formation d'équipe

D'après notre définition de la collaboration (voir chapitre 1), travail d'équipe et collaboration sont très proches : les agents partagent les mêmes buts et ne poursuivent pas d'objectif individuel<sup>2</sup>. Contrairement aux mécanismes de formation de coalitions dans lesquels les agents se rassemblent en fonction de leurs intérêts, une équipe est formée en fonction des capacités de chacun à participer à l'accomplissement des objectifs de l'équipe.

### Compétences

Tidhar *et al.* considèrent ainsi que pour qu'une équipe puisse accomplir une certaine tâche, elle doit disposer d'un plan conjoint et des compétences de base nécessaires pour mener à bien ce plan [Tidhar *et al.*, 1992]. Dans ce cadre, un plan est considéré comme une « recette » prête à être instanciée (en attribuant des agents à certains rôles en fonction de leurs compétences) et qui permet d'atteindre un ou plusieurs buts. Les compétences de base d'une équipe sont en fait celles des agents qui en font partie, et on considère qu'une équipe dispose d'un plan s'il fait partie de l'intersection des *bibliothèques de plans* individuelles des membres.

---

<sup>2</sup>Si ce n'est pour le bien de l'équipe.

La « construction » de l'équipe est alors menée par un *team leader* qui sélectionne les membres en fonction de leurs compétences et des plans qu'ils connaissent. Dans [Tidhar *et al.*, 1996], les auteurs proposent que les utilisateurs du système (ceux pour qui les équipes d'agents travaillent, *a priori* un ou plusieurs opérateurs humains) puissent guider la formation des équipes afin d'accélérer le processus, mais aussi afin d'influer sur le résultat.

### Négociation

Dignum *et al.* proposent d'utiliser des *conversations* entre agents plutôt que des protocoles rigides (comme *ContractNet* [Smith, 1980]) afin de former des équipes [Dignum *et al.*, 1999 ; Dignum *et al.*, 2001]. Après une phase qui permet de déterminer les membres et les équipes potentiels pour accomplir une tâche, l'agent à l'initiative du processus de création de l'équipe dispose d'un ensemble d'équipes potentielles (classées par ordre de préférence). Vient alors une phase de négociation entre l'« initiateur » de l'équipe et les membres potentiels afin de les amener à adopter les états mentaux (par exemple : intention commune ou croyance mutuelle, voir section 1.5.2 ou 2.4.2) nécessaires pour faire partie de l'équipe. Ces négociations prennent place dans le cadre de la théorie du dialogue [Walton et Krabbe, 1995], ce qui permet de les formaliser dans une logique temporelle et de déterminer de manière formelle l'issue d'un dialogue.

### Complexité

La réorganisation d'une équipe est nécessaire lorsqu'un problème a lieu au cours de son activité et qu'il remet en cause l'organisation de l'équipe : par exemple si un agent quitte l'équipe, d'autres doivent assumer ses fonctions (son rôle) dans l'équipe ou bien une réorganisation complète peut être nécessaire.

Nair *et al.* utilisent le modèle des problèmes de décision de Markov décentralisés partiellement observables (POMDP, voir [Bernstein *et al.*, 2000]) afin de formaliser et d'étudier la complexité des processus de formation et de réorganisation d'équipe [Nair *et al.*, 2002 ; Nair *et al.*, 2003]. Ils définissent formellement le problème de formation d'équipe (ou plus précisément d'allocation de rôle) dans le cadre de RMTDP (*Role-based Multiagent Team Decision Process*) qui permet d'évaluer de manière quantitative différents mécanismes d'allocation et de réallocation de rôles. L'approche RMTDP permet

également de déterminer l'optimalité de ces différents mécanismes selon les domaines où ils sont appliqués, ainsi que comment et à quel prix il est possible de les améliorer.

### 2.4.2 Modèle mental partagé

La notion de travail d'équipe (*teamwork*) joue un rôle important dans le domaine des SMA, mais aussi en psychologie cognitive [Brannick *et al.*, 1995] ou dans le domaine de l'entraînement humain [Stout *et al.*, 1997]. Le concept de modèle mental partagé (*shared mental model*, [Blickensderfer *et al.*, 1997]) constitue sans doute l'apport principal de la psychologie dans ce domaine. Il s'agit pour les membres d'une équipe de partager des informations telles que :

- l'état de l'environnement de l'équipe ainsi qu'un modèle de son évolution ;
- la tâche de l'équipe ainsi que son état d'avancement ;
- la situation des différents membres de l'équipe ;
- le mode de fonctionnement de l'équipe, sa structure et le cas échéant les rôles joués par les différents membres.

Ces informations doivent permettre aux membres d'une équipe d'utiliser des stratégies de *collaboration* efficaces. Par exemple, puisqu'il dispose d'un modèle de ce que doivent accomplir les autres membres de l'équipe, un agent peut anticiper les besoins d'un coéquipier et lui fournir une information dont il dispose et dont il sait qu'il aura besoin [Yen *et al.*, 2002]. De même, ces connaissances peuvent permettre de détecter les anomalies dans le déroulement de l'activité de l'équipe, par l'absence d'un comportement attendu de la part d'un membre ou par un comportement inattendu (voir par exemple SAM en annexe (A.4)).

## 2.5 Formation dynamique de groupes

Récemment, un certain nombre de travaux ont porté sur la formation dynamique de groupes, c'est-à-dire donner à des agents la possibilité de former rapidement des coalitions pour répondre aux évolutions de l'environnement, mais également de pouvoir faire évoluer ces coalitions en fonction des conditions. En effet, la plupart des SMA doivent faire face à des environnements dynamiques dans lesquels les agents n'ont ni le temps ni

les informations nécessaires pour aboutir à une formation de coalition optimale (par exemple, le calcul de la valeur de Shapley nécessite  $o(n)$  actions de communication entre agents et  $o(2^n)$  calculs, pour  $n$  agents [Shehory et Kraus, 1995]).

### 2.5.1 Suivi de cible multicateur

Une partie de ces travaux s'apparente aux approches par négociation, avec une construction incrémentale d'une solution entre les agents potentiellement concernés. Ainsi, dans [Soh et Tsatsoulis, 2002a], les auteurs proposent un algorithme de formation dynamique de coalition à base de négociation dont l'objectif est d'assurer (1) une bonne probabilité de formation d'une coalition ; (2) même en situation d'informations partielles ; (3) la robustesse du processus de formation ; et (4) la flexibilité des coalitions formées, qui doivent pouvoir adapter dynamiquement leur composition. Cet algorithme a été utilisé dans le domaine du *suivi de cible multicateur* pour lequel un ensemble de capteurs (les agents) doivent coopérer pour suivre un objet mouvant. Ce système a été conçu pour faire face à deux types d'événements : l'arrivée d'une nouvelle cible (trois agents sont nécessaires pour suivre une cible de manière précise) et un manque de ressources de calcul.

### 2.5.2 DCF-S

Une approche par simulation appelée DCF-S (*Dynamic Coalition Formation – Simulation*) a été proposée par [Klusch et Gerber, 2002]. Une coalition est initiée par un CLA (*Coalition Leading Agent*) qui utilise les informations dont il dispose pour déterminer des coalitions potentielles, qu'il évalue par simulation, afin d'en obtenir un ensemble susceptible d'agréer les autres participants. Ensuite, un processus de négociations bilatérales a lieu entre le CLA et chaque membre potentiel (sélectionnés en priorité par rapport à leur utilité pour la coalition), qui ont pour résultat des accords de coopération et de redistribution de la valeur de la coalition.

### 2.5.3 PEACH

Dans le cadre du projet PEACH (*Personal Experience with Active Cultural Heritage*), nous avons proposé un mécanisme de négociation qui permet

à un ensemble d'agents susceptibles de répondre à une requête de déterminer quel sous-ensemble d'entre eux va coopérer pour le faire, et selon quelles modalités [Busetta *et al.*, 2003a ; Busetta *et al.*, 2003b]. À l'arrivée d'une requête, commence un processus de négociation que l'on peut se représenter comme la réduction incrémentale d'un ensemble de solutions possibles en fonction des préférences individuelles (capacités des agents mais aussi charge de travail courante) jusqu'à la convergence du processus. Ce mécanisme tire parti de l'architecture de communication LoudVoice, présentée au chapitre 4.

## 2.6 États mentaux de groupe

Un agent délibératif est doté d'un modèle de son environnement mais aussi des autres agents (qui en font partie). Ses connaissances portent donc à la fois sur le monde (physique) qui l'entoure, mais aussi sur les connaissances des autres agents. Les structures de coopération que nous avons vues jusqu'ici (de manière non exhaustive) ont en commun le fait que les agents doivent partager certaines informations sur leurs relations ou leur organisation.

La notion d'état mental de groupe englobe une grande variété de concepts, comme les connaissances ou intentions communes (*cf.* section 1.5.1), ou encore les croyances mutuelles. Ces concepts sont utilisés pour représenter la manière dont les agents doivent « synchroniser » leurs informations (appartenance à un groupe, tâche en cours, règles de coopération, *etc.*) au sein d'une structure de coopération. Plutôt que de tenter d'en dresser un inventaire complet nous allons aborder les plus communs et surtout illustrer les difficultés liées à l'obtention de tels *états mentaux synchronisés*.

### 2.6.1 L'histoire des enfants sales

L'histoire classique des enfants sales [Barwise, 1981] va nous permettre d'introduire la notion de connaissance commune.

*« Imaginons  $n$  enfants jouant dehors alors que leur mère leur a interdit de se salir. En jouant,  $k$  d'entre eux se salissent le visage de boue. Chacun peut voir la boue sur le visage des autres, mais pas sur le sien, et décide de ne rien dire aux autres. Leur père arrive et dit « Au*

*moins l'un d'entre vous s'est sali le visage. » Le père répète ensuite la question « Qui peut me dire s'il a de la boue sur le visage ? » jusqu'à satisfaction. En admettant que les enfants sont intelligents, honnêtes et qu'ils répondent simultanément, que va-t-il se passer ? »*

Nous pouvons prouver que les  $k - 1$  premières fois que le père pose sa question aucun enfant ne parle, et qu'à la  $k$ -ième fois les  $k$  enfants sales peuvent affirmer qu'ils le sont.

La preuve se fait par récurrence sur le nombre d'enfants sales.

1. Pour  $k = 1$  le résultat est trivial : l'enfant sale voit que tous les autres sont propres et peut donc répondre qu'il est sale dès la première question.
2. Supposons que le résultat soit vrai jusqu'à  $k - 1$  enfants sales. Chacun des  $k$  enfants sales voit  $k - 1$  enfants sales, et voici ce qu'il peut se dire : « si je suis propre, il y a  $k - 1$  enfants sales en tout et ils vont répondre qu'ils le sont à la  $(k - 1)$ -ième question ». Or à la question  $k - 1$  personne ne pipe mot et chaque enfant sale en déduit que les autres enfants sales voient eux aussi  $k - 1$  enfants sales, et donc que son « hypothèse de propreté » est fautive, ce qui lui permet de répondre à la  $k$ -ième question.  $\square$

L'énigme des enfants sales, en plus de nous avoir fait réfléchir quelques minutes, fait apparaître un phénomène curieux, le père a permis aux enfants de résoudre un problème en leur donnant une information qu'ils connaissaient déjà (si  $k > 1$ ) : « Au moins l'un d'entre vous s'est sali le visage ». Cela peut sembler étrange, mais en réalité le père leur en a appris plus : non seulement au moins l'un d'entre vous est sale, mais les autres le savent, ils savent que vous le savez, ils savent que vous savez qu'ils le savent, et ainsi de suite à l'infini.

### 2.6.2 Hiérarchie de connaissance de groupe

Nous empruntons ici à [Halpern et Moses, 1990] pour détailler différents niveaux de connaissance que peuvent avoir des agents rationnels en présence d'autres agents. Nous noterons  $K_i\varphi$  le fait que l'agent  $i$  connaît le fait  $\varphi$ .<sup>3</sup> Nous ne définirons pas précisément ce qu'est la connaissance, mais nous imposons tout de même deux conditions :

<sup>3</sup>On pourra par exemple noter  $K_iK_j\varphi$  le fait que l'agent  $i$  sait que l'agent  $j$  connaît  $\varphi$ .

1. les connaissances d'un agent ne dépendent que de sa séquence de perception et de ses connaissances initiales ;
2. seuls des faits *vrais* peuvent être connus, autrement dit :  $K_i\varphi \supset \varphi$ . Cette condition est utilisée classiquement pour différencier connaissance et croyance [Halpern et Moses, 1992].

Maintenant que nous disposons d'une interprétation de ce qu'est une connaissance pour un agent, nous pouvons tenter de la généraliser à un groupe (un ensemble) d'agents  $G$ . Il y a plusieurs possibilités plus ou moins contraignantes, parmi elles citons :

$D_G\varphi$  : la connaissance de  $\varphi$  est *distribuée* dans le groupe  $G$ . Un agent hypothétique doté de toutes les connaissances des membres de  $G$  connaît  $\varphi$ , par exemple avec deux agents  $i$  et  $j$ , tels que  $K_i\psi$  et  $K_j(\psi \supset \varphi)$ , nous avons  $D_{\{i,j\}}\varphi$ .

$S_G\varphi$  : au moins un des membres (*someone*) de  $G$  connaît  $\varphi$ , c'est-à-dire, de manière plus formelle,  $S_G\varphi \equiv \bigvee_{i \in G} K_i\varphi$ .

$E_G\varphi$  : tous les membres (*everyone*) de  $G$  connaissent  $\varphi$ , c'est-à-dire, de manière plus formelle,  $S_G\varphi \equiv \bigwedge_{i \in G} K_i\varphi$ .

$E_G^k\varphi$  : « tous les membres de  $G$  savent que tous les membres de  $G$  savent que ... tous les membres de  $G$  savent que  $\varphi$  est vrai. », avec  $k$  fois la formule « tous les membres de  $G$  savent que ». On peut le définir plus formellement par :  $E_G^1\varphi = E_G\varphi$  et  $E_G^{k+1}\varphi = E_G E_G^k\varphi$  pour  $k \geq 1$

$C_G\varphi$  :  $\varphi$  est une *connaissance commune* dans  $G$ . Autrement dit, la conjonction infinie :  $C_G\varphi \equiv E_G\varphi \wedge E_G^2\varphi \wedge \dots \wedge E_G^p\varphi \wedge \dots$

Ces notions forment une hiérarchie (en omettant le groupe pour plus de lisibilité) :

$$C\varphi \supset \dots \supset E^{k+1}\varphi \supset E^k\varphi \supset \dots \supset E\varphi \supset S\varphi \supset D\varphi \supset \varphi$$

Notons que jusqu'à  $E_G\varphi$  (au sens de la hiérarchie  $E\varphi \supset S\varphi \supset D\varphi \supset \varphi$ ) les agents de  $G$  n'ont pas à connaître ce que connaissent les autres, par exemple avec  $D_G\varphi$  les agents de  $G$  peuvent ne pas avoir la moindre idée que la connaissance de  $\varphi$  est distribuée dans le groupe, et la connaissance de  $D_G\varphi$  peut n'être accessible qu'à un observateur hypothétique capable d'avoir accès instantanément aux connaissances de tous les agents.

À partir de  $E_G^1\varphi$  entre en jeu la notion de connaissance sur la connaissance d'un autre agent. C'est cette notion qui va poser de nombreux problèmes dans l'obtention notamment d'une connaissance commune. En effet une telle connaissance ne peut s'obtenir que par la communication entre agents ou bien en l'incluant par construction dans les connaissances de base des agents.

### 2.6.3 Problème des deux généraux

Le problème des deux généraux ([Gray, 1978], figure 2.2) illustre parfaitement les mécanismes et les difficultés mis en jeu pour obtenir une connaissance commune en communiquant, ne serait-ce qu'entre deux agents.

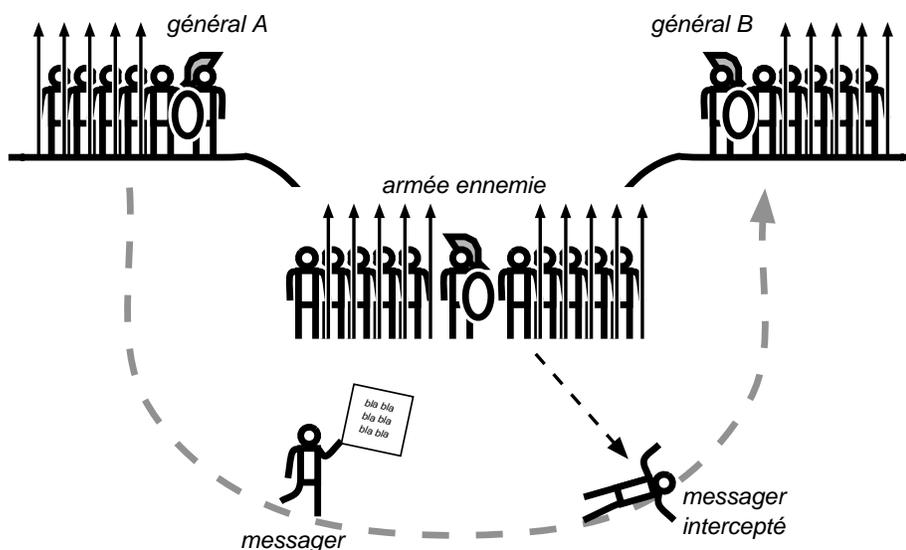


FIG. 2.2 – Illustration du problème des deux généraux.

« Deux divisions d'une même armée (commandées respectivement par les généraux A et B) campent sur deux hauteurs surplombant une même vallée abritant une armée ennemie. Il est clair que si les deux divisions attaquent simultanément elles écraseront leur adversaire mais que chacune sera vaincue si elle attaque seule. Aucun des deux généraux ne prendra la décision d'attaquer s'il n'est pas certain que l'autre

*attaquera en même temps. Les deux généraux ne peuvent communiquer que par l'intermédiaire de messagers. Malheureusement ces messagers ne sont pas sûrs d'atteindre leur destination car ils peuvent être tués en chemin ou se perdre. »*

Supposons que  $A$  envoie un message à  $B$  disant : « Attaquons à l'aube ».  $A$  ne peut pas savoir si le message a été reçu par  $B$  à moins de recevoir une confirmation venant de  $B$ . Si  $B$  reçoit bien ce premier message il enverra donc un second message pour accuser réception et donner son accord.  $A$  n'attaquera donc que s'il reçoit ce second message car sinon il courrait le risque que  $B$  ne soit pas au rendez-vous.  $B$  ne pourra savoir si son message est bien arrivé que grâce à un troisième message envoyé par  $A$ , et ainsi de suite.

Nous pouvons prouver qu'il n'est pas possible pour les deux généraux d'être certains d'attaquer simultanément en raisonnant sur le nombre  $k$  de messages échangés [Halpern et Moses, 1990].

1. Il est clair que  $k = 0$  n'est pas suffisant.
2. Supposons que  $k$  messages ne sont pas suffisants, mais que  $k + 1$  suffisent. L'émetteur du message  $k + 1$  ne sait pas si son message est arrivé à destination, or les deux généraux doivent attaquer tous les deux, cela veut donc dire que le destinataire du message  $k + 1$  attaque qu'il reçoive ou non ce message. Donc le message  $k + 1$  est inutile et  $k$  messages suffisent, ce qui contredit notre hypothèse.  $\square$

De manière générale, il n'est pas possible d'obtenir une connaissance commune entre des agents qui utilisent des moyens de communication non fiables (des messages peuvent être perdus) ou au temps de propagation non nul. En effet un état de connaissance commune au sens strict du terme ne peut être atteint que simultanément par tous les agents concernés.

## 2.7 Conclusion

Nous avons vu que les structures mises en jeu pour la coopération prennent des formes assez diverses selon que les agents ont été conçus pour atteindre des buts individuels (coalitions) ou collectifs (équipes). Toutefois, même si ces deux grands types d'approches ont des philosophies assez différentes, elles se rejoignent parfois sur les techniques employées, on a vu par exemple que les négociations pouvaient être utilisées aussi bien

pour former une coalition en répartissant les gains que pour assembler une équipe capable de mener à bien une tâche.

D'autre part, toutes ces structures ont en commun de reposer sur l'existence d'états mentaux de groupe au sein du SMA. En effet, elles ne peuvent avoir d'autre existence que sous la forme d'informations (connaissances, croyances, règles, *etc.*) « dans » chaque agent. Nous avons vu que l'obtention de tels états mentaux cohérents dans un groupe est difficile voire impossible, notamment en ce qui concerne les communications. C'est pourquoi le prochain chapitre leur est consacré.