

Jacques FERBER

Coopération réactive et émergence

1. Introduction

L'émergence d'organisation est souvent considérée comme un phénomène secondaire des interactions accomplies entre agents. De nombreux travaux, en particulier dans le domaine de la vie artificielle et des systèmes multi-agents, ont montré expérimentalement que des organisations pouvaient émerger des interactions entre individus (Deneubourg et al., 1987 ; Steels, 1991 ; Erceau et Ferber, 1991). En particulier, dans le système MANTA qui simule le comportement d'un nid de fourmis (Drogoul et Ferber, 1994), il est possible de considérer l'organisation du travail et la structuration des rôles comme des phénomènes qui émergent des interactions individuelles. De même, dans les exemples de simulation de robots explorateurs (Steels, 1989 ; Drogoul et Ferber, 1992), les phénomènes de pistes ou de chaînes que l'on peut simuler sont le fruit des coordinations locales qui ont lieu entre les agents. Néanmoins, l'émergence est souvent présentée comme une sorte de phénomène "magique" qui apparaît "par surprise" et comme conséquence des interactions locales sans que l'on essaye de comprendre *pour quelle raison* ces structures émergent et quel est leur intérêt.

D'autre part, bien que le problème de la coopération entre agents ait été soulevé depuis longtemps, peu de théories ont tenté, avant l'apparition des systèmes multi-agents, de décrire de manière opératoire les diverses formes de coopération, ni de montrer la relation entre les individus, les tâches qu'ils accomplissent et l'intérêt

global pour le groupe¹. La plupart des travaux traitants de la coopération portent sur l'intérêt qu'il y a ou non à coopérer avec autrui, comme dans le cadre du dilemme du prisonnier (Axelrod, 1992), ou sur la manière de communiquer dans les groupes restreints en psychologie sociale (Stoetzel, 1978). Mais alors que ces travaux mettent l'accent soit sur la décision et l'intérêt qu'il y a à coopérer pour un agent, soit sur les rapports d'autorité et sur les relations affectives qui amènent les individus à coopérer et à travailler ensemble, les systèmes multi-agents reformulent le problème en mettant en avant les caractéristiques cognitives et comportementales nécessaires à la mise en oeuvre d'un travail collectif.

La coopération est souvent avancée comme l'un des concepts clés de l'intelligence artificielle distribuée (IAD) (Demazeau et Müller, 1991). On peut citer notamment les travaux de Lesser et Durfee (1987), Galliers (1991), Castelfranchi et Conte (1991) et Bouron (1992). Mais la plupart ne fournissent que des réponses partielles et ne s'intéressent de toutes manières qu'à des agents cognitifs, c'est-à-dire à des agents capables d'avoir des représentations et de planifier leurs actions. Les travaux sur la coopération réactive, c'est-à-dire sur la coopération par des agents qui ne font que réagir aux stimuli provenant de leur environnement, n'en sont encore qu'à leurs débuts. Les travaux de Deneubourg et al. (1993), Theraulaz et al. (1991), Steels (1994), Drogoul (1993) et Ferber (1994) témoignent cependant de l'importance du domaine.

Y a-t-il une correspondance entre émergence d'organisation et coopération ? C'est à cette question que cet article est consacré. En analysant la coopération d'un point de vue extérieur, et en essayant de décrire les méthodes permettant à des agents réactifs de coopérer, nous verrons comment les techniques permettant à des individus de survivre passent naturellement par la constitution d'organisations sociales qui, en retour, assurent à l'individu une meilleure chance de survie. C'est cette double implication qui nous

¹ Il existe néanmoins tout un courant de travaux philosophiques portant sur la coopération et l'action collective dans une perspective cognitive. On pourra se référer à (Livet, 1994) pour une présentation récente et en français de ces réflexions.

paraît caractéristique des systèmes multi-agents, qu'il s'agisse de systèmes naturels ou de leur mise en oeuvre dans des systèmes artificiels. Une grande partie de cet article est ainsi consacrée à la problématique de la coopération dans les systèmes multi-agents, afin de montrer comment les différentes formes de coopération tendent à la constitution d'organisations émergentes.

2. Formes de coopération

Il existe plusieurs points de vue sur la coopération selon que l'on considère que la coopération est une attitude des agents qui décident de travailler en commun, ou que l'on se pose comme un observateur qui interprète *a posteriori* les comportements en les qualifiant de coopératifs ou non, à partir de critères sociaux tels que l'interdépendance des actions, ou le nombre de communications effectuées.

2.1. La coopération comme attitude intentionnelle

Dans le premier cas, la coopération est caractéristique d'une *attitude* (posture) des agents. On dit que des agents coopèrent s'ils s'engagent dans une action commune après avoir identifié et adopté un but commun. La création d'une association¹, telle qu'une association de défense de l'environnement par exemple, correspond à ce schéma : les membres de l'association ont identifié un objectif commun, lutter contre les sources de pollution, et ils s'engagent à participer à une tâche commune, la défense de la nature. La constitution de l'association résulte de la prise de conscience de l'existence d'un but commun et de l'engagement de chacun de ses membres.

De même, lorsque des individus acceptent de travailler dans une entreprise, ils s'engagent pour participer à un travail en commun, en

¹ Nous émaillerons notre propos de quelques exemples tirés de la vie courante (associations, entreprises, etc.). Il ne faut y voir que des illustrations destinées à éclairer notre démarche, mais en aucun cas des études tendant à montrer que les organisations sociales humaines pourraient être analysées par notre modèle qui ne s'applique, ici, qu'à l'étude d'organisations d'agents réactifs.

considérant non seulement que leurs buts sont compatibles avec ceux de l'entreprise, mais aussi que les employés comme l'organisme qui les emploie peuvent y trouver leur intérêt : l'entreprise, en utilisant les compétences de ceux qu'elle engage, et les employés en recevant une rémunération.

Le problème de l'engagement envers un but collectif est appelé *adoption de but* (goal adoption) par J. Galliers (1991), C. Castelfranchi et R. Conte (1991), laquelle est considérée comme un élément essentiel de l'activité sociale. En particulier pour J. Galliers, il y a coopération si les agents s'engagent dans une action et identifient un but commun, c'est-à-dire reconnaissent que les autres agents sont engagés dans le même but.

Cependant, toute forme de coopération est-elle le fruit d'une intention de coopérer ? On reconnaît souvent (en éthologie en particulier) que des insectes sociaux tels que des fourmis qui travaillent ensemble pour récupérer de la nourriture au dehors de leur nid coopèrent même si elles n'en ont pas conscience (Fresneau, 1994). De manière plus générale, des agents réactifs qui parviennent à effectuer des tâches complexes à plusieurs peuvent-ils être coopératifs ? Si l'on répond positivement, alors il faut supposer que la coopération ne résulte pas seulement d'une attitude, même si une attitude pour coopérer peut être un très bon catalyseur de coopération, mais qu'elle doit être comprise en termes de comportement et de résultats. Dans ce cas, la coopération n'est plus directement le produit d'une *intention de coopération*, nécessairement absente, mais le *bénéfice positif* obtenu grâce aux interactions des agents.

2.2. La coopération considérée du point de vue de l'observateur

C'est pourquoi, certains auteurs, (Durfee et al., 1989 ; Bouron, 1992) notamment, considèrent la coopération comme une qualification de l'activité d'un ensemble d'agents par un observateur extérieur qui n'aurait pas accès aux états mentaux des agents. Par exemple, si l'on qualifie le comportement des fourmis de coopératif, c'est parce que, en tant qu'observateur on observe un certain nombre de phénomènes que l'on utilise comme des indices d'une activité de coopération. L'idée d'*indice de coopération* (MIRIAD,

1992) est particulièrement intéressante, car elle permet de s'affranchir des caractéristiques internes des agents et ne s'occuper que de leur comportement observable. Par exemple, voici un ensemble d'indices proposés par T. Bouron pour qualifier les activités de coopérations.

- (i1) La coordination d'actions, qui concerne l'ajustement de la direction des actions des agents dans le temps et l'espace.
- (i2) Le degré de parallélisation, qui est fonction de la répartition des tâches et de leur résolution concurrente.
- (i3) Le partage des ressources, qui concerne l'utilisation des ressources et des compétences.
- (i4) La robustesse, qui concerne l'aptitude du système à suppléer la défaillance d'un agent.
- (i5) La non-redondance des actions, qui caractérise le faible taux d'activités redondantes.
- (i6) La non-persistance des conflits, qui témoigne du faible nombre de situations bloquantes.

La définition d'un tel ensemble repose en premier lieu sur des considérations d'observabilité et de quantifiabilité. Ces indices doivent pouvoir être examinés et mesurés pour que l'on puisse caractériser le degré de coopération qui existe entre différents agents. Mais l'application de ces contraintes n'est pas évidente : quelle mesure donner à la coordination des actions ? comment quantifier la robustesse d'un système ? La définition de critères objectifs et mesurables est fondamentale si l'on veut donner un statut précis à la coopération. Autrement, on risque de définir ce concept en termes d'autres concepts tout aussi vagues ce qui empêcherait toute définition de critères effectifs de coopération.

Cet ensemble d'indices doit de plus être cohérent : la mesure de la robustesse est plutôt une caractéristique de la capacité d'un système à s'adapter, et la non-redondance des activités vient en opposition avec le degré de parallélisation des tâches : plus on parallélise, plus on tend à ce que les tâches soient dupliquées pour être exécutées plus rapidement, et plus on introduit de redondance. Enfin, ces indices doivent être hiérarchisés : le degré de parallélisation ou la coordination d'action sont des conséquences

d'indices plus principaux tels que le partage des ressources ou l'évitement de conflits.

Peut-on alors donner un ensemble minimal d'indices à partir desquels il serait possible de construire d'autres indices plus complexes ? Nous pensons que cela est possible et, par la suite, nous ne retiendrons que deux indices que nous estimons nécessaires et suffisants pour caractériser s'il y a ou non activité de coopération : l'efficacité du travail en groupe d'une part, et l'existence de mécanismes de résolution de conflits d'accès à des ressources. Ces critères sont facilement mesurables et viennent s'intégrer naturellement à la typologie des situations d'interactions présentées précédemment.

Définition : On dira que plusieurs agents *coopèrent* ou sont dans une *situation de coopération* si l'une des deux conditions est vérifiée :

1. Si l'ajout d'un nouvel agent permet d'accroître différentiellement les performances du groupe.
2. S'il existe des conflits (potentiels ou actuels) d'accès à des ressources et que l'action des agents sert à éviter ou à sortir de tels conflits.

Le premier indice recouvre un critère différentiel : si les agents coopèrent, un nouvel agent est considéré comme une aide pour l'ensemble du groupe. Lorsque ce critère est vérifié, on dit que les agents *collaborent* ou qu'ils sont dans une *situation de collaboration*. Ce type de situation est caractéristique des sociétés d'insectes, mais aussi des entreprises, et d'une manière générale de tous les groupes de travail. Accroître les performances peut avoir pour objectif de simplement améliorer un certain paramètre, tel que la quantité de minerai rapportée à la base pour des robots explorateurs, ou d'accroître le bénéfice pour une entreprise. Mais, plus fondamentalement, le gain en performance sous-tend un objectif plus primordial qui est celui de la survie. La survie, qu'il s'agisse de la préservation d'une espèce, d'un écosystème, d'un groupe ou de chacun de ses membres, semble constituer la finalité ultime des systèmes naturels où les problèmes d'adaptation et de

reproduction sont en jeu, et en particulier de tous les systèmes biologiques. Par exemple, les membres d'une horde coopèrent parce qu'il leur est plus facile de survivre et de se développer en commun qu'individuellement. Les éthologistes considèrent en effet que la spécialisation des individus d'une collectivité et la coopération qui lui est sous-jacente, est un bon indice de leur développement sur l'échelle de l'évolution. Par exemple, les colonies de fourmis les plus primitives vivent généralement dans des nids de quelques unités, alors que les fourmis les plus évoluées peuvent comporter plusieurs millions d'individus (Corbara 1991).

Si au contraire l'arrivée d'un agent n'améliore pas les performances du groupe, cet agent sera considéré comme un gêneur pour les activités collectives. Dans ce cas, le second critère permet néanmoins de reconnaître qu'il y a coopération même s'il n'y a pas d'accroissement différentiel de performances. Les agents coopèrent alors pour faire en sorte que la diminution de performances ne soit pas trop radicale. C'est généralement le cas, lorsque la quantité de ressources est limitée : l'introduction de nouveaux agents peut avoir des conséquences négatives sur le fonctionnement du groupe et les actions coopératives telles que l'évitement, l'établissement de techniques de résolution de conflits, ou la constitution d'organisations de production et de transport de ressources, ou tout simplement la formation de files d'attente, sont alors des réponses collectives pour limiter la dégradation des performances individuelles et de groupe. Dans ce cas, on dira que l'on se trouve dans une *situation de résolution de conflits*. Ce type de situation est caractéristique des situations d'encombrement, telles que la circulation routière ou aérienne, l'accès à un photocopieur par un ensemble de personnes, la recherche d'un taxi à un aéroport, l'accès à un point d'eau ou à un processeur, etc. Il existe de nombreuses manières de résoudre des conflits. Certaines reposent simplement sur la définition d'actions permettant d'éviter *a priori* l'apparition de conflits, tels que les comportements d'évitement, l'établissement de dominance ou la définition de règles de priorité, d'autres enfin tentent d'annuler les conflits qui apparaissent par l'arbitrage, la négociation, l'utilisation des relations de dominance ou par la destruction pure et simple des participants au conflit.

Néanmoins, bien que distinguées ici, les situations de collaboration et celles de résolution de conflits s'avèrent souvent très liées : s'il se pose des problèmes de survie, l'augmentation des performances permettra généralement de mieux survivre dans un univers difficile¹. De même l'évitement de conflits permet soit de faire survivre les membres du groupe (par exemple en évitant des collisions ou des luttes) soit d'améliorer les performances par rapport à un système sans coordination. Cette définition de la coopération qui s'appuie totalement sur le point de vue de l'observateur, permet de caractériser de manière objective ce qu'est une situation de coopération en termes d'amélioration de performances, sans faire intervenir de considérations sur ce qui se passe dans la tête de l'agent. Qu'il s'agisse d'agents réactifs ou cognitifs, la coopération est ramenée à des critères simples et observables. De ce fait, si l'on peut définir la *coopération intentionnelle* comme une situation de coopération dans laquelle les agents ont l'intention de coopérer, ce qui suppose bien évidemment qu'il s'agisse d'agents cognitifs et capables d'intentions, on parlera de *coopération réactive* lorsque les agents ne sont pas doués d'intentions explicites, mais que leur comportement collectif répond au moins à l'un des deux critères mentionnés ci-dessus. On peut donc parler de coopération même si les agents n'ont aucune représentation du monde dans lequel ils évoluent et des autres agents, et n'ont donc aucune conscience des conséquences de leurs actes, ni même bien souvent de la présence des autres agents. Par exemple des termites construisent un nid en agissant simplement en réaction aux différents stimuli qu'elles reçoivent. Leur technique de construction repose simplement sur des phénomènes perceptifs : les ouvriers déposent des boulettes de terre et d'excrément préférentiellement là où se trouve d'autres boulettes. De ce fait, elles développent des colonnes, puis en déposant des boulettes plutôt du côté où se trouve l'odeur d'autres termites, elles en viennent à

¹ Dans certains cas, l'amélioration des performances individuelles peut avoir un effet négatif sur le groupe. Si par exemple des herbivores sont capables de mieux exploiter leur territoire, ils peuvent aboutir à l'épuisement de leur ressource et entraîner leur perte.

former des arches (Wilson, 1971). Dans ce cas, elles vaquent à leurs occupations sans qu'il y ait d'intention à coopérer et même sans qu'il y ait interaction directe entre les fourmis, la coopération intervenant comme un *effet secondaire* des actions de la population des fourmis dans sa totalité.

Il est possible de caractériser trois familles d'indices permettant de caractériser les trois grandes fonctions de la coopération que sont l'amélioration de la survie, l'accroissement de performances et la résolution de conflits.

2.3. Objectif : survie

Les *indices de survie* reflètent la capacité d'un individu ou d'un groupe à maintenir son unité fonctionnelle alors qu'il est confronté à des forces qui tendent à détruire cette unité. On peut distinguer deux types de survie : la survie de l'individu, c'est-à-dire sa capacité pour un agent à persister dans son être, et la survie collective qui correspond au maintien du groupe. Si la première est relativement facile à identifier, la seconde apparaît comme étant plus difficile à vérifier et à définir. Entend-on par survie du collectif la survie de l'ensemble de ses membres ou la survie de l'organisation issue du rassemblement, peut-être temporaire, d'un ensemble d'agents ? Dans le premier cas, la situation est simple car on peut se ramener à une analyse en termes de survies individuelles, alors que dans le second cas il s'avère parfois difficile de savoir à quel moment l'organisation collective a disparu. Néanmoins, on peut généralement se donner des critères formels permettant de décréter qu'une organisation collective a cessé d'exister. On dira par exemple qu'une entreprise survit tant qu'elle n'a pas déposé son bilan, ou qu'un groupe de robots existe tant qu'il en comporte au moins deux.

Il est possible de définir la capacité individuelle de survie d'un agent de deux manières : soit en considérant sa probabilité de survie dans un environnement donné, soit en analysant son bilan énergétique, c'est-à-dire le rapport qui existe entre la quantité d'énergie qu'il absorbe et celle qu'il dépense par unité de temps : lorsque ce rapport est supérieur à 1, l'individu ou le groupe sont capables de survivre et même éventuellement d'investir leur surplus d'énergie à des tâches supplémentaires non-rentables

immédiatement, mais qui permettront par la suite d'améliorer encore ce bilan énergétique. La première est plus adaptée à l'analyse différentielle des comportements chez des agents très simples, alors que la seconde est plus générale mais aussi plus compliquée à manipuler puisqu'elle fait intervenir des facteurs économiques, et suppose une bonne connaissance des quantités "énergétiques" entrantes et sortantes.

Nous allons maintenant montrer sur un exemple simple d'agents chasseurs comment des mécanismes simples de coopération peuvent amener les agents à augmenter leur capacité de survie.

Supposons que des agents prédateurs puissent survivre s'ils sont capables de trouver à chaque unité de temps une proie. La probabilité de trouver une proie est donnée par P_{ind} pour une espèce de prédateur et pour un environnement donné. Si les individus sont isolés, la probabilité de survie est alors directement égale à la probabilité de trouver une proie :

$$\sigma_{ind} = P_{chasse}$$

En se regroupant, les prédateurs augmentent leur probabilité de survie si les proies qu'ils ramènent peuvent nourrir un plus grand nombre d'agents que de chasseurs. Ainsi, la probabilité de survie pour un agent s'il y a regroupement est égale à

$$\sigma_{regroup} = P_{chasse} * k/n * c$$

où k représente le nombre d'agents qu'une proie peut nourrir, n est le nombre d'agents que contient le groupe et c est le nombre de chasseurs. La survie par regroupement est donc améliorée par rapport à la survie individuelle si $\sigma_{regroup} > \sigma_{ind}$, c'est-à-dire si $k*c > n$, ou autrement dit si la quantité de nourriture est plus que suffisante pour le nombre d'agents concernés. Le regroupement, en permettant le partage des proies a donc amélioré la capacité de survie des agents.

2.4. Coopération et performances

Les *indices de performance* traduisent la capacité d'un agent ou d'un groupe d'agents à accomplir des tâches définies par des tiers. L'observateur peut appartenir au groupe, par exemple être analyste financier d'une entreprise, ou être extérieur au groupe, s'il s'agit du programmeur de ses robots. Les indices de performance sont variés, mais ils doivent traduire les caractéristiques intrinsèques d'un collectif. Par exemple, pour un groupe de robots récupérateurs de minerai, on pourra donner comme indice de performance la quantité de minerai retournée par unité de temps, ou bien le nombre d'actions (mouvements) nécessaire pour retourner une quantité de minerai donnée. Pour un système de coordination d'actions permettant à des avions d'éviter toute collision, on pourra donner comme indice la déviation entre les trajectoires effectuées et les trajectoires idéales issues des plans de vols (Zeghal,1993). Enfin, si cela est possible il s'avère toujours intéressant de revenir à des considérations énergétiques et considérer des indices de performance comme des indices de rendements énergétiques.

L'analyse que nous avons faite sur le regroupement de chasseurs peut aussi s'appliquer à celle de la performance d'un ensemble de robots explorateurs devant aller chercher du minerai. Le regroupement associé à la communication peut améliorer la productivité de ces robots par rapport à un même ensemble de robots non-coopérants. Rappelons que, pour ramener du minerai, les robots doivent d'abord trouver des zones de minerai avant d'en rapporter des échantillons. Supposons que nous n'ayons initialement qu'un seul robot. Au départ, il cherche les zones de minerai au hasard, puis s'il en détecte une il se dirige vers elle, remplit sa benne de minerai et retourne à la base. On peut améliorer son efficacité en augmentant le nombre d'agents. Avec plusieurs robots non coopérants chaque robot ne fait qu'augmenter linéairement les performances du groupe : il n'y a pas d'augmentation de la productivité. Si au contraire, dès qu'un robot trouve du minerai il en avertit les autres, soit en donnant directement la position, soit en laissant des marques sur le sol (voir ci-dessous), alors il est possible de mobiliser un plus grand nombre de robots à la tâche de transport de minerai et donc d'augmenter la productivité de chacun.

Amplification qualitative et quantitative

La coopération consiste donc à amplifier les capacités des agents pris isolément et à augmenter leurs performances. Cette augmentation peut être *quantitative* comme nous venons de le voir, mais elle peut aussi être *qualitative*, c'est-à-dire rendre possibles des actions impossibles à réaliser par des agents isolés.

Les collaborations permettant d'augmenter qualitativement les performances des agents sont essentielles car sans elles l'action n'est tout simplement pas possible. Supposons par exemple que l'on veuille réaliser un magazine. Un agent qui ne sait qu'écrire des articles mais ne sait pas mettre en page ni imprimer ne pourra pas à lui seul obtenir le résultat désiré. Il lui faut l'aide d'un maquettiste et d'un imprimeur. Et cela est vrai aussi pour les agents informatiques : un logiciel qui sait calculer mais ne sait pas imprimer aura besoin à la fois des services d'une imprimante et de ceux d'un logiciel d'impression.

Les performances qualitatives des agents sont donc fondamentales pour autoriser des performances qualitatives de groupe, mais il ne faut pas négliger les performances quantitatives car elles permettent parfois des résultats qualitatifs impossibles sans cette collaboration. Par exemple, si un robot transporteur veut porter un objet qui pèse 100 kg et qu'il ne dispose que d'une force lui permettant de porter 70 kg, il sera totalement incapable d'accomplir son action : si l'objet est d'un seul tenant, il n'est pas possible de n'en porter que 70%. De ce fait, l'aide d'autres robots, bien que n'apportant qu'une amplification initialement quantitative, rend possible une action et transforme cette aide quantitative en collaboration qualitative. On dit alors que l'on a à faire à un *effet de masse*, lié à une quantité critique d'agents. Ces phénomènes sont dûs à des caractéristiques non linéaires de la collaboration par addition des capacités des différents agents. Cette notion est bien connue en chimie et en physique nucléaire, où certaines réactions ne peuvent avoir lieu que si la concentration atteint un certain seuil appelé *seuil ou masse critique d'effet*.

Inversement, il est possible d'obtenir des avantages quantitatifs à partir d'amplification qualitative. C'est alors la présence d'un agent

supplémentaire doué de compétences nouvelles, qui entraîne une amélioration des performances de l'ensemble de l'organisation. Par exemple, dans le cas de robots transporteurs de minerai, l'introduction d'un robot capable de construire des routes permettra d'améliorer la vitesse de déplacement des robots et ainsi d'accroître les performances du groupe. On dira qu'il s'agit d'un phénomène de *catalyse*, par analogie avec les phénomènes chimiques où la seule présence de certains composants chimiques, les catalyseurs, permet d'améliorer les vitesses de réaction, ces catalyseurs n'intervenant pas directement dans les réactions.

En conséquence, on peut noter que les amplifications, par le biais de la coopération peuvent être quantitatives ou qualitatives et que les avantages obtenus peuvent être eux aussi qualitatifs ou quantitatifs. On obtient alors le tableau 1 qui représente les quatre situations de collaboration possibles :

Avantages	Qualitatif	Quantitatif
Amplification		
Qualitative	Collaboration qualitative	Catalyse
Quantitative	Effet de masse	Collaboration quantitative

Tableau 1. Les quatre situations de collaboration.

2.5. Résolution de conflits

Du fait de leur autonomie, c'est-à-dire de leur capacité à déterminer leur propre comportement, les agents sont amenés à se trouver dans des situations où leurs intérêts peuvent être contradictoires, ils sont alors en situation objective de conflits. Ces situations proviennent essentiellement d'un problème d'accès à des ressources limitées : deux agents désirent au même moment quelque chose qui ne peut être partagé ou pour lequel toute répartition diminue ce que l'un des agents aurait pu obtenir si l'autre n'avait pas été présent.

Dans ce cas, les ressources sont limitées, et il sera nécessaire d'utiliser des techniques de résolution de conflits pour gérer cette opposition. Les situations conflictuelles sont à la fois l'effet et la cause d'interactions. Elles naissent de conflits pour accéder aux

ressources, et nécessitent des interactions supplémentaires pour sortir de ces conflits, qu'il s'agisse de techniques de négociation, d'arbitrage ou d'utilisation d'un règlement, voire de recours à la compétition et à la force.

Bien qu'il existe des situations pures, qui soient uniquement conflictuelles ou synergiques, la plupart des situations naturelles présentent à la fois des composantes conflictuelles et synergiques. Par exemple, deux laboratoires de biologie penchés sur le même problème sont à la fois concurrents dans une situation conflictuelle, puisque seul le premier aura droit aux honneurs de la découverte, et partenaires, parce que les découvertes de l'un vont aider celles de l'autre. Dans une niche écologique, les individus de différentes espèces coopèrent, puisque leur survie dépend des cycles de nutrition qui font intervenir les autres espèces de la niche, mais ils sont aussi adversaires puisqu'il y a compétition entre les espèces voisines pour l'acquisition des ressources de l'écosystème. D'une manière générale, les systèmes complexes sont fondés sur une intégration des situations synergiques et conflictuelles, les premières assurant l'augmentation des performances, et les secondes permettant la sélection des agents concernés.

Les *indices conflictuels* traduisent très simplement le nombre d'agents entrants en conflit (on pourra compter le nombre effectif de collisions entre des avions (dans un simulateur de préférence) sans ou avec coordination d'actions) ou le nombre d'individus voulant accéder à la même ressource au même instant (le nombre de processus en attente d'être exécutés sur un processeur par exemple).

3. Les méthodes de la coopération

Comment coopérer ? Si nous avons étudié les conditions de la coopération, nous n'avons encore rien dit des moyens que l'on peut mettre en oeuvre pour coopérer. Ces moyens, que nous appellerons *méthodes de coopération* sont au nombre de six : le regroupement et la multiplication, la communication, la spécialisation, la collaboration par partage des tâches et des ressources, la coordination d'actions, la résolution de conflits par arbitrage et négociation

3.1. Le regroupement et la multiplication

La première méthode est évidemment la plus évidente et pour cela souvent oubliée. Elle consiste tout simplement pour les agents à se rapprocher physiquement, c'est-à-dire à constituer soit un bloc plus ou moins homogène dans l'espace, soit un réseau de communication permettant à plusieurs agents de se comporter comme s'ils étaient physiquement les uns à côté des autres.

Le monde animal utilise en effet le regroupement pour assurer un grand nombre de besoins et en particulier pour améliorer la sécurité de chacun des membres en réalisant une défense de groupe (la masse est plus solide, plus difficile à attaquer), en bénéficiant d'une vigilance accrue (quelques uns font la garde pendant que les autres peuvent vaquer sans risque à d'autres occupations) et enfin en augmentant la probabilité que, si un prédateur attaque, ce soit l'un des autres membres qui disparaisse. Vivre en communauté facilite aussi la prise de nourriture puisqu'il suffit qu'un des membres du groupe trouve quelque chose d'intéressant pour que tous les autres en profitent. Par exemple, dès qu'un goéland plonge et ramène du poisson (ou des déchets de nourriture abandonnés par un bateau) les autres goélands se regroupent auprès du premier et bénéficient des découvertes du premier. La chance de trouver un compagnon sexuel pour la reproduction est-elle aussi améliorée. Les groupes de primates en témoignent. Autrement, il faut utiliser d'autres mécanismes de signalisation, parfois beaucoup plus complexes, pour que les individus puissent se reproduire. La vie en groupe facilite aussi l'acquisition de comportements complexes en permettant aux petits de se confronter aux adultes et d'avoir un grand nombre de modèles de comportements à leur disposition qu'ils peuvent alors imiter. Enfin, les groupes simplifient les problèmes de navigation comme le montrent les formations d'oiseaux migrateurs, les bancs de poissons ou les troupeaux d'éléphants. L'effort de navigation est globalement diminué si un seul (ou un petit nombre) d'entre eux seulement décide de l'endroit où aller, les autres suivant le mouvement.

Finalement, on peut considérer qu'un groupe agit comme un organisme distribué. Il y a les spécialistes de l'exploration de nourriture, ceux de la défense ou de la chasse, ceux qui assurent la

reproduction et ceux enfin qui guident le groupe pour qu'il trouve des contrées qui seront favorables au groupe. Tous les membres agissent à la fois pour leur bien et pour celui du groupe, car, en s'occupant de la société tout entière, ils s'occupent d'eux et de leur descendance.

D'autre part, la multiplication, c'est-à-dire la simple augmentation quantitative des individus dans un système donné présente des avantages considérables, tant du point de vue de l'augmentation des performances que de celui de sa fiabilité. Par exemple, dans le cas des robots récupérateurs de minerai, le fait de disposer d'un grand nombre de robots n'est pas neutre quant à la fiabilité du système. Si la performance globale en cas d'absence de pannes est égale à la somme des performances individuelles, c'est-à-dire que l'augmentation différentielle de performance est nulle, il n'en est plus de même si les agents peuvent avoir des pannes. Si l'on ne dispose que d'un seul agent, toute panne peut avoir des conséquences fâcheuses car la tâche ne pourra pas être effectuée. Au contraire, si l'on dispose de plusieurs agents, la redondance permettra d'accroître la fiabilité du système (sans qu'il y ait nécessairement augmentation de la productivité individuelle).

3.2. La communication

La communication agrandit les capacités perceptives des agents en leur permettant de bénéficier des informations et du savoir-faire des autres agents. C'est par le cri que des animaux indiquent la présence d'un prédateur, le guetteur agissant alors comme l'organe de perception des membres du groupe, et le cri est alors une sorte d'influx nerveux qui déclenche le comportement de fuite s'il y a lieu.

Les communications sont indispensables à la coopération, et il est difficile de concevoir un système d'agents coopérants s'il n'existe pas un système permettant aux agents d'échanger des informations ou de véhiculer des requêtes. Dans les systèmes réactifs, les communications s'effectuent souvent par propagation d'un signal dans un milieu où il se diffuse. Un agent émet un signal qui se diffuse dans l'environnement et dont l'intensité décroît en fonction de la distance. Cela rend particulièrement compte des propagations d'odeurs, mais aussi des diffusions de signaux

sonores. Seuls les signaux visuels ne sont pas bien rendus par ce type de propagation, et l'on parlera alors plutôt de rayon de perception. La communication constitue l'un des moyens fondamentaux pour assurer la répartition des tâches et la coordination d'actions comme nous le verrons ci-dessous.

3.3. La spécialisation

La réalisation performante d'une tâche suppose souvent des caractéristiques structurelles et comportementales qui ne peuvent permettre d'effectuer d'autres tâches de manière performante. Par exemple, un robot très adapté dans l'excavation et la recherche de minerai en profondeur, dont toute la structure est dédiée au forage de trous, ne sera pas nécessairement très bien adapté au transport de minerai ou à sa détection, qui nécessite des robots capables de passer n'importe où pour diminuer le temps de transport. La spécialisation n'est pas nécessairement le fruit d'un choix a priori. Des agents initialement totipotents peuvent se spécialiser progressivement dans l'accomplissement de leur tâche, ce qui revient à leur associer des rôles temporaires par une sorte d'adaptation individuelle. Cette spécialisation peut être bénéfique à la collectivité en augmentant la capacité du groupe à résoudre plus rapidement un problème semblable. Par exemple, dans le problème du tri collectif (Deneubourg, 1991) dans lequel des agents doivent placer en tas des objets "bleus" ou "rouges" à partir d'une répartition aléatoire. Leur comportement consiste simplement à se déplacer aléatoirement, et, s'ils rencontrent un tas d'objet, à le prendre et à le redéposer près d'un tas de même couleur. A. Drogoul a montré que, si l'on utilise des agents capables de renforcer leur tendance à s'occuper préférentiellement d'une couleur, alors une société spécialisée est plus efficace qu'une société d'agents totipotents (Drogoul, 1993), du fait de la diminution des errements aléatoires résultant d'une meilleure sensibilité à un type particulier d'objet.

3.4. La collaboration par partage des tâches et des ressources

La collaboration consiste à travailler à plusieurs sur un projet, une tâche commune. Nous appellerons collaboration par la suite l'ensemble des techniques permettant à des agents de (se) répartir des tâches, des informations et des ressources de manière à réaliser une oeuvre commune. Résoudre un problème de collaboration consiste donc à répondre à la question «qui fait quoi?» par rapport à un travail donné. Il existe de nombreuses manières de répartir des

tâches et des moyens. Dans les systèmes d'agents cognitifs, l'allocation des tâches passe par des mécanismes d'offre et de demande. On distingue alors les mécanismes de répartition centralisée, dans lesquelles un agent coordinateur centralise les offres et les demandes et les répartit ensuite au mieux, des approches distribuées dans lesquelles tout agent peut être à la fois offrant ou demandeur, sans qu'il existe un organe centralisateur. Deux techniques alors s'opposent : celles qui s'appuient sur des réseaux d'accointances, c'est-à-dire sur des représentations mutuelles des capacités de chacun et celles qui reposent sur la notion de marché, par des techniques d'appel d'offre et de propositions dont la plus connue est le "réseau contractuel" (*contract net*) (Davis et Smith, 1983).

On peut être surpris de penser qu'il est aussi possible de parler d'allocation de tâches dans le cas d'agents réactifs. En effet, on pourrait supposer que leurs capacités limitées ne leur permettraient pas de mettre en oeuvre des mécanismes aussi complexes que les algorithmes que nous venons d'analyser. Pourtant, il est possible de faire en sorte d'une part que les tâches soient distribuées aux agents, et d'autre part que les agents eux-mêmes se spécialisent dans l'accomplissement de telle ou telle tâche.

L'allocation réactive fait appel à la notion de signal et non à celle de message. Les signaux, comme nous l'avons vu précédemment sont des formes non intentionnelles de communication, propagées dans l'environnement par diffusion, le signal décroissant généralement d'intensité avec la distance. Ces signaux sont donc des formes élémentaires de communication pour lesquelles il n'existe pas de sémantique nécessairement partagée par l'émetteur et le récepteur : un même signal pourra induire deux comportements différents dans deux agents différents. L'exemple le plus caractéristique est le cri d'un jeune animal : pour ses congénères il pourra déclencher (en fonction de l'espèce) un comportement de protection, alors que pour un prédateur il donnera lieu au contraire à un comportement de poursuite et de chasse.

L'un des intérêts majeurs de ces signaux pour l'allocation de tâches vient de ce que leur intensité décroît avec la distance à la source. En effet l'intensité $I(x)$ au point x d'un signal qui se propage instantanément est généralement donnée par l'équation :

$$I(x) = \frac{k}{\text{dist}(x, x_0)^2} \quad \text{ou} \quad I(x) = \frac{k}{\text{dist}(x, x_0)}$$

où k est une constante qui représente l'intensité maximale du signal à la source. La dégradation de l'intensité des signaux en fonction de la distance introduit une différence dans les agents qui perçoivent ce signal. Il y a ceux qui se trouvent proches de la source et pour lesquels le signal sera fort, et ceux qui se trouveront plus éloignés et qui ne recevront donc qu'un signal atténué.

Le principe de l'allocation de tâches repose alors sur le déclenchement différencié d'un comportement en fonction de l'intensité du signal qu'un agent reçoit. Par exemple si un agent A peut effectuer l'une des deux tâches T_1 ou T_2 et qu'à ces tâches soient associées respectivement les signaux S_1 et S_2 , il exécutera celle pour laquelle le stimulus (calculé comme le produit de l'intensité du signal par un coefficient interne correspondant à la tendance qu'un agent a de faire une tâche) est le plus fort :

$$\begin{aligned} &\text{exécuter}(T1) \text{ si } S1 > S2 \\ &\text{exécuter}(T2) \text{ si } S2 < S1 \end{aligned}$$

Lorsque les intensités sont identiques, et pour éviter le célèbre blocage de l'âne de Buridan qui ne pouvait choisir entre deux tas de foin s'il se trouve à égale distance des deux tas, on tire aléatoirement entre les deux actions.

Ce déclenchement différentiel introduit dans les systèmes multi-agents deux formes de compétition :

1. La première correspond à une *compétition intra-agent* qui porte sur les tâches qu'un agent peut accomplir. La prise de décision d'un agent réactif dépend en effet de quatre facteurs : l'intensité initiale du signal, la tendance à accomplir telle ou telle tâche, la distance à la source, et la capacité de perception de l'agent. Deux signaux qui ont même intensité pourront être différenciés par un même agent en fonction de ses propres tendances. Par exemple, un prédateur ne portera pas le même intérêt à un signal lui indiquant la position d'une proie s'il a le ventre creux ou s'il vient de manger. En fonction de la combinaison de ces quatre facteurs et donc du poids des stimuli,

les différentes tâches qu'un agent peut accomplir seront sélectionnées par un mécanisme de choix majoritaire.

2. La seconde correspond à une *compétition inter-agent* et concerne la relation respective des agents vis-à-vis de la source du signal. Du fait que l'intensité relative est plus forte lorsqu'on se trouve près de la source, les agents les plus proches auront plus tendance à accomplir les tâches liées à ce stimulus que les plus éloignés. Cette compétition n'est cependant pas sans poser des problèmes : que se passe-t-il en effet lorsque deux agents décident de répondre à ce stimulus, et qu'un seul agent suffit pour répondre à la demande ? Dans l'exemple des robots récupérateurs de minerai, supposons qu'un robot foreur ait besoin de faire transporter son minerai jusqu'à la base. Pour ce faire, il émet un signal *demandeTransport* qui se propage et diminue d'intensité avec la distance. Si plusieurs robots transporteurs reçoivent le signal et se déplacent jusqu'à la source, lequel aura effectivement la possibilité de transporter le minerai ? La solution évidente consiste à servir le premier arrivé. Si les transporteurs ont la même capacité de locomotion, le plus proche de la source arrivera normalement le premier, et aura donc le bénéfice de l'exécution de la tâche.

Mais tous les problèmes ne sont pas résolus pour autant. Les techniques de compétition n'optimisent pas toujours le comportement des agents. Par exemple, supposons qu'il existe deux zones de forages relativement éloignées l'une de l'autre, et que les deux robots foreurs F_1 et F_2 placés dans ces zones aient besoin d'un transporteur en même temps (fig. 1). Si les transporteurs A_1 et A_2 sont situés plus près de F_1 que de F_2 , ils répondront tous deux favorablement à la demande de F_1 et se dirigeront vers F_1 (1). Mais comme A_1 est plus près de F_1 que A_2 c'est lui qui transportera le minerai de F_1 et A_2 se sera déplacé pour rien (2). Mais si F_2 continue à avoir besoin d'un transporteur, A_2 sera maintenant sensible à son appel et se dirigera vers lui (3 et 4).

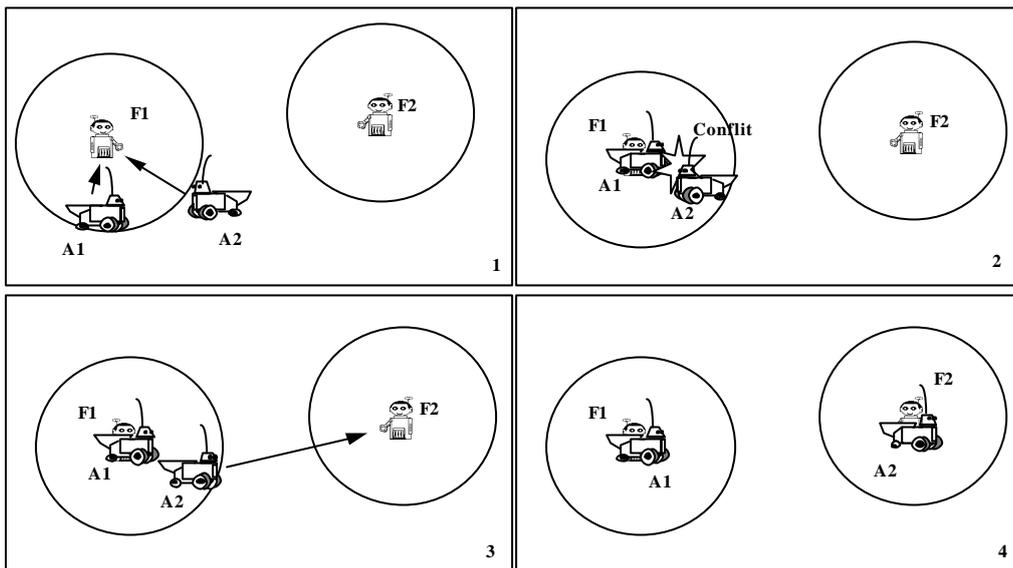


Figure 1. Les différentes phases d'un système d'allocation réactive de tâches

On voit que dans cette situation, le transporteur A_2 a d'abord été vers F_1 pour se rendre compte qu'il était déjà aidé par A_1 et qu'il n'avait pas besoin de lui. Il a donc effectué le chemin $A_{2(0)}F_1$ puis le parcours F_1F_2 , au lieu du simple trajet $A_{2(0)}F_2$, ce qui peut s'avérer coûteux si les agents A_1 et A_2 sont suffisamment loin.

Le fait que le trajet soit non optimisé fait malheureusement parti des techniques réactives qui ne tendent généralement pas vers l'optimum, mais compensent cette perte par une grande capacité d'adaptabilité. Il est clair en effet que cette technique est totalement indépendante du nombre d'agents mis en oeuvre, et mieux encore, plus le nombre d'agents est important plus on a de chances de répondre aux demandes de réalisation de tâches. Que l'on supprime un agent et le système continue à fonctionner comme s'il ne s'était rien passé. Nul besoin de protocoles complexes, ni de vérification de terminaison, ni d'une manière générale d'un grand attirail algorithmique.

Les techniques réactives de coopération assurent une bonne répartition des tâches en fonction des besoins, au prix d'une certaine redondance de moyens. Par exemple, dans le système MANTA de modélisation de fourmis (Drogoul et Ferber, 1994), la répartition des tâches entre les agents est assurée par de simples

techniques de compétition intra et inter agents, auxquelles ont été ajoutés des mécanismes de renforcement visant à faire en sorte qu'un agent ayant déjà effectué une certaine tâche ait plus "tendance" à l'accomplir de nouveau. On peut voir sur la figure 2 que ces techniques contribuent à assurer de véritables "rôles" aux agents et à les spécialiser. De plus, cette répartition des rôles est relativement stable si la demande est elle-même stable. Dans un système ouvert comme peut l'être un nid de fourmis, le nid agit comme une machine collective qui s'adapte à la variation des besoins. Si toutes les fourmis ayant un certain rôle viennent à disparaître, celles qui restent modifieront leur spécialisation pour s'adapter aux modifications et permettre au nid de survivre.

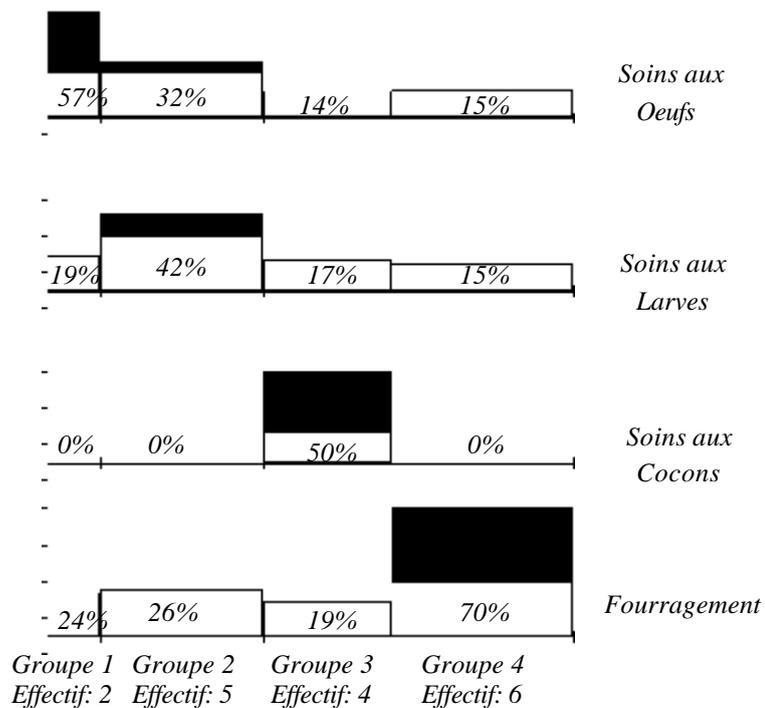


Figure 2. Sociogramme d'une population de fourmis dans le système MANTA d'après (Drogoul 1993). Les lignes correspondent aux tâches et les colonnes à des regroupement de fourmis ayant des profils semblables.

3.5. La coordination d'actions

Gérer un ensemble d'agents suppose l'exécution d'un certain nombre de tâches supplémentaires qui ne sont pas directement productives mais qui servent simplement à faire en sorte que les actions productives puissent s'accomplir dans les meilleures conditions. Lorsqu'il s'agit de système monolithique, ces tâches supplémentaires font partie du système organisationnel, mais dans le cas d'un système multi-agents, c'est-à-dire d'un travail nécessairement distribué, on parle de *tâches de coordination*. Celles-ci sont indispensables dès lors que l'on se trouve en présence d'un ensemble d'agents autonomes qui poursuivent leurs propres buts, la réalisation de tâches productives entraînant avec elles tout un cortège de tâches de coordination sans lesquelles les premières ne peuvent être accomplies.

La coordination d'actions a été décrite par Thomas Malone (1988) comme l'ensemble des activités supplémentaires qu'il est nécessaire d'accomplir dans un environnement multi-agents et qu'un seul agent poursuivant les mêmes buts n'accomplirait pas.

La coordination d'actions est nécessaire pour les raisons principales suivantes :

1. Les agents ont besoin d'informations et de résultats que seuls d'autres agents peuvent fournir. Par exemple, un agent qui construit des murs aura besoin d'être approvisionné en briques, un agent qui surveille l'activité d'un procédé industriel en un point donné aura besoin d'informations sur l'état de ce procédé en d'autres endroits.
2. Les ressources sont limitées. On ne fait parfois attention aux actions des autres que parce que les ressources dont on dispose sont réduites et que d'autres utilisent ces mêmes ressources. Le contrôle du trafic aérien constitue un exemple paradigmatique de la nécessité d'une coordination pour éviter les collisions éventuelles.
3. Optimiser les coûts. Coordonner des actions permet aussi de diminuer les coûts en éliminant les actions inutiles et en évitant les redondances d'action. Par exemple, si deux personnes doivent se rendre au même endroit, elles pourront n'utiliser qu'une seule voiture et économiser ainsi l'essence correspondant à un trajet supplémentaire.

4. Permettre à des agents ayant des objectifs distincts mais dépendants les uns des autres de satisfaire ces objectifs et d'accomplir leur travail en tirant éventuellement parti de cette dépendance.

Dans les systèmes multi-agents réactifs, la coordination d'actions fait essentiellement appel à des techniques de champs de forces et de marquage des environnements. En particulier, l'utilisation de marques peut servir à améliorer les performances d'un groupe et à former des structures auto-catalytiques, c'est-à-dire des organisations qui émergent des interactions. Les premiers travaux ayant porté sur l'usage de telles marques pour résoudre le problème de la récupération de minerai ont été dûs à J.-L. Deneubourg (Deneubourg et Goss, 1989) et à L. Steels (1989). Une discussion des approches possibles ainsi que de leur efficacité peut être trouvée dans (Drogoul et Ferber, 1992).

L'exemple de la collecte d'échantillon de minerai permet en effet de comprendre comment l'utilisation des marques peut servir à réduire l'espace de recherche des robots, et donc à améliorer leur productivité. Rappelons que le problème de l'exploration consiste pour les robots à trouver des échantillons de minerai et à les ramener à la base. Le comportement des robots peut donc être décrit simplement par la succession de phases d'exploration et de transport des échantillons jusqu'à la base :

```
Règle Explorer
  si je ne porte rien
  et je ne perçois aucun minerai
  alors j'explore de manière aléatoire

Règle Trouver
  si je ne porte rien
  et que je perçois du minerai
  alors je prends un échantillon du minerai

Règle Rapporter
  si je porte du minerai
  et je ne suis pas à la base
  alors retourner à la base

Règle Déposer
  si je porte du minerai
  et je suis à la base
  alors déposer le minerai
```

Mais le problème de la découverte des échantillons demeure. Si ces derniers sont disséminés de manière aléatoire et que les robots

n'ont aucun indice sur leur présence, les robots suivront un déplacement aléatoire jusqu'à ce qu'ils perçoivent un tas de minerai pour en ramener un échantillon à la base.

L'inconvénient de cette technique est d'être relativement coûteuse, puisque, si les agents se déplacent de manière aléatoire, le temps mis pour trouver un tas de minerai est proportionnel à la surface d'exploration. Dans ce cas, les actions des robots ne sont absolument pas coordonnées, et tout le travail mis par un robot pour trouver un tas de minerai est totalement perdu pour les autres. Une technique qui peut être employée pour améliorer l'efficacité de la recherche consiste évidemment à utiliser des techniques de communications entre agents de manière à ce qu'ils soient au courant de la présence d'un tas de minerai. Il est possible de mettre en oeuvre des techniques de communications fondées sur des envois de messages, les robots indiquant aux autres où se trouve le tas de minerai. Mais d'autres solutions, plus réactives, peuvent être envisagées. En particulier, en s'inspirant de la manière dont certaines fourmis communiquent entre elles la position des sources de nourritures en déposant de petites quantités de phéromones, Deneubourg et Steels ont imaginé que des robots explorateurs pourraient déposer des marques dans l'environnement pour indiquer la présence de tas de minerai. L'idée consiste à faire déposer ces marques par les robots lorsqu'ils ont trouvé du minerai et qu'ils retournent à la base. Lorsqu'un robot en train de chercher du minerai en perçoit une il se dirige vers cette marque, ce qui lui permet de localiser plus rapidement des gisements de minerai. Le comportement de ces robots est alors modifié de la manière suivante (on modifie les règles Explorer et Reporter et on ajoute la règle SuivreMarque) :

```
Règle Explorer
  si je ne porte rien
  et je ne perçois aucun minerai
  et je ne perçois aucune marque
  alors j'explore de manière aléatoire
```

```
Règle Reporter
  si je porte du minerai
  et je ne suis pas à la base
  alors retourner à la base
  et déposer une marque
```

```
Règle SuivreMarque
```

```

si je ne porte rien
et je ne perçois aucun minerai
et je perçois une marque
alors je me dirige vers cette marque

```

Un robot ayant trouvé du minerai qui retourne vers la base va créer un "chemin d'odeur", c'est-à-dire une suite de marques déposées sur le sol. Les robots en train d'explorer vont se trouver captés par le chemin et auront donc tendance à suivre les traces ce qui les amènera normalement vers le tas de minerai (on fait l'hypothèse que les robots savent s'éloigner de la base). De ce fait, avec le temps, de plus en plus de robots seront amenés à trouver le tas de minerai et donc eux-mêmes à marquer le chemin en déposant des marques, ce qui aura pour effet de renforcer encore la tendance des robots à suivre ce chemin, dans un phénomène auto-catalytique caractéristique des rétroactions positives.

La figure 3 montre la situation d'un ensemble de robots cherchant des échantillons de minerai et utilisant des marques pour améliorer le processus. Cela donne l'impression que les agents suivent un chemin d'odeurs pour retrouver l'échantillon de minerai.

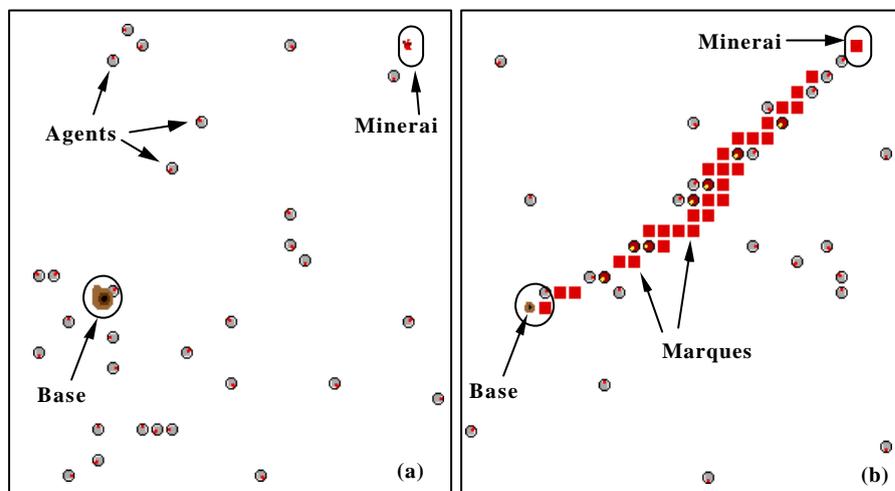


Figure 3. Une vue de l'émergence de files de robots collecteurs à partir d'un mécanisme auto-catalytique.

Cependant, l'utilisation de marques pose parfois un problème : leur présence peut induire des agents en erreur. Par exemple, si la source de minerai est éteinte et s'il reste des marques, alors les agents seront conduits à suivre les marques pour aboutir à un

endroit maintenant vide. Il faut donc que les marques soient elle-mêmes des éléments dynamiques capables de disparaître lorsqu'il n'y a plus d'échantillon à aller chercher, c'est-à-dire que le chemin soit volatile et disparaisse avec le temps. Deux solutions sont envisageables :

1. La première consiste à utiliser des marques volatiles. Si le chemin n'est pas constamment renforcé par le dépôt de nouvelles marques, les marques disparaîtront. Cette technique, qui s'apparente à ce qui se passe dans la nature avec des fourmis, nécessite seulement une bonne paramétrisation de la durée de rémanence des marques. Si celle-ci est trop grande, on se retrouve dans la situation précédente qui "piège" des robots alors que cela n'est plus nécessaire, et si elle est trop faible, le mécanisme de marquage n'aura pas le temps de fonctionner pour de nouvelles fourmis.
2. On peut aussi faire en sorte que les agents enlèvent une partie des marques. Au retour au lieu de ne déposer qu'une seule marque les robots en déposent deux, et à l'aller, lorsqu'ils suivent le chemin des marques, ils en reprennent une. De ce fait s'il n'existe plus de minerai, les robots piégés par le chemin des marques élimineront les marques déposées préalablement, ce qui aura pour effet de "nettoyer" le chemin de toutes les marques inutiles.

3.6. La résolution de conflits par arbitrage et négociation

L'arbitrage et la négociation sont deux des moyens utilisés par les systèmes multi-agents cognitifs pour résoudre les conflits et empêcher que des désaccords entre individus ne se transforment en luttes ouvertes et que le système dans son entier ne dégrade ses performances. L'arbitrage conduit à la définition de règles de comportements qui agissent comme des contraintes sur l'ensemble des agents, mais dont le résultat global a pour effet de limiter les conflits et de préserver à la fois les individus mais surtout les sociétés d'agents.

Dans les sociétés humaines, le comportement des individus est contraint par un ensemble de lois et réglementations qui régissent les

activités sociales et agissent comme des contraintes plus ou moins internalisées. Il existe un organe d'arbitrage, la justice, dont la fonction est de faire respecter ces règles collectives et de veiller à leur application. Cet organe agit aussi pour déterminer les responsabilités dans les conflits et décider des punitions que les personnes jugées coupables doivent subir. Mais si dans les systèmes multi-agents cognitifs, les techniques de négociation sont à l'honneur, il n'en est pas de même des systèmes multi-agents réactifs qui ne peuvent entrer dans des phases de résolution de conflits de ce type. Dans ce cas, ces dernières se résument à l'évitement par répulsion et contournement fondées sur la notion de champ de force (Zeghal et al., 1993).

4. L'émergence d'organisation comme conséquence de la coopération

4.1. Le système des activités de coopération

Les fonctions et les méthodes de coopération sont bien entendu liées entre elles. Certaines méthodes favorisent plus certaines fonctions, d'autres résolvent des problèmes intermédiaires tels que la répartition des tâches ou la coordination des actions. Il est possible de donner une vision intégrée de ces différents éléments sous la forme d'un système (Lapierre, 1992) représenté figure 4. Ce diagramme montre leur interdépendance, et comment les objectifs de survie, de performances et de résolution de conflits sont assurés par des méthodes élémentaires qui elles-mêmes entraînent des problèmes qui ne peuvent être assurés que par des corps de techniques plus élaborés.

L'augmentation de la probabilité de survie des agents passe en particulier par l'augmentation des performances du groupe, ce qui requiert l'application de méthodes telles que le regroupement, l'augmentation du nombre des agents et la différenciation de leurs rôles. Mais en retour ces méthodes posent d'autres problèmes tels que la répartition des tâches et l'augmentation du nombre des conflits dûs à des problèmes d'accès à des ressources et au manque de coordination. Les méthodes d'allocation de tâches, de

communication, de coordination d'actions et de résolution de conflits (arbitrage, négociations, hiérarchisations) servent à résoudre ces problèmes et participent de ce fait à l'augmentation des performances du groupe. Enfin, de toutes ces techniques émergent des organisations, c'est-à-dire des ensembles structurés d'individus dont le comportement est (plus ou moins) intégré au fonctionnement global.

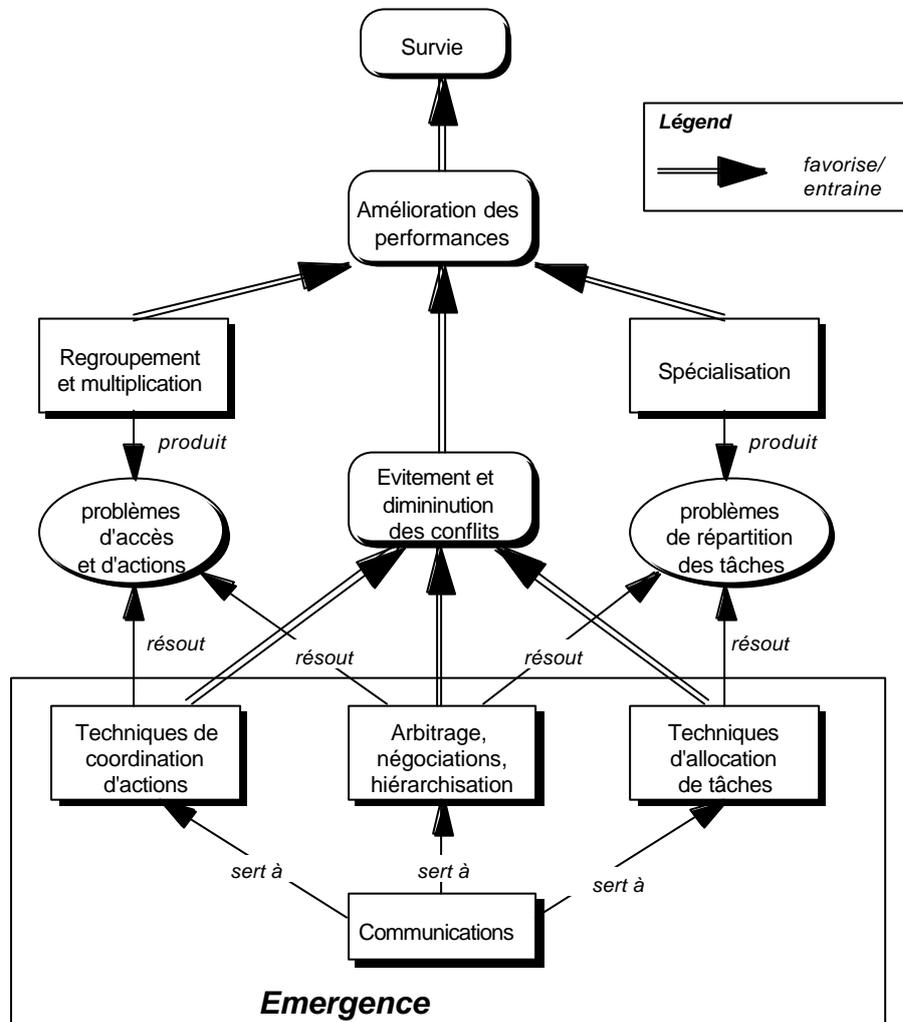


Figure 4. Le système des activités de coopération. Les organisations émergent des interactions provenant des techniques d'allocation de tâches (collaboration), d'arbitrage, de négociations et de coordination d'action.

La coopération nécessite donc la mise en oeuvre de mécanismes pour améliorer les performances du groupe afin d'accroître la survie de ses membres, mais elle produit en contre-partie des structures sociales qui présentent des conséquences à la fois positives et négatives pour les agents.

4.2. Avantages

La coopération, en favorisant les performances collectives des agents, offre ainsi un certain nombre d'avantages qui s'expriment soit par des améliorations individuelles, telles que l'accroissement de productivité ou l'augmentation de la probabilité de survie des individus, soit par des améliorations de groupes telles que l'accomplissement de tâches impossibles autrement à réaliser. Voilà une liste non-exhaustive des conséquences positives de la coopération¹ :

- 1 *Accomplir des tâches impossibles à réaliser seul.* il s'agit d'un avantage qualitatif essentiel comme nous l'avons vu. Dans ce type de situation seule la collaboration permet d'accomplir l'action désirée.
- 2 *Améliorer la productivité de chacun des agents.* Cet avantage quantitatif permet d'accomplir des phénomènes connus en gestion commerciale sous le nom d'*économie d'échelle* qui consiste à considérer que la production augmente de manière plus que linéaire (et supérieure au linéaire) en fonction du nombre d'agents ce qui entraîne un accroissement de la productivité. Nous en avons vu un exemple avec l'étude des robots récupérateurs de minerai. Il s'agit d'une caractéristique essentielle de la collaboration en favorisant l'émergence de nouvelles structures grâce aux économies réalisées par les différents agents.
- 3 *Augmenter le nombre de tâches réalisées dans un délai imparti.* La simple multiplication du nombre des agents permet d'augmenter quantitativement le nombre de tâches réalisables et

² Durfee, Corkill et Lesser (1989) proposent une classification semblable dans le cadre de la résolution distribuée de problèmes, mais il ne différencie pas les avantages qualitatifs des bénéfices quantitatifs.

de diminuer ainsi le temps d'exécution nécessaire à l'accomplissement d'un ensemble de tâches données. Mais la collaboration peut s'avérer indispensable s'il existe un temps limité pour effectuer un certain quota de tâches. Par exemple, pour exécuter un contrat portant sur la fourniture d'un produit au bout d'un délai précis il est parfois nécessaire que plusieurs personnes collaborent à la réalisation du produit simplement pour faire face à l'exécution du contrat. Cette amélioration quantitative se transforme du fait du délai associé au contrat, en un bénéfice qualitatif, l'inobservation du contrat entraînant toute une série d'inconvénients.

- 4 *Améliorer l'utilisation des ressources.* En gérant mieux l'utilisation de certaines ressources par collaboration, il est possible de diminuer les coûts de fonctionnement en équilibrant les besoins, ce qui revient alors soit à augmenter la productivité du système (raison 2) soit à améliorer les performances et rendre possibles des actions (raison 3). Par exemple, si un programme fonctionne sur un multi-processeur, il peut être intéressant aux processeurs de collaborer pour que les agents puissent équilibrer leur charge de travail sur les différentes machines par un mécanisme dynamique de régulation des charges (load balancing).

Il existe bien évidemment un lien très étroit entre les performances collectives et les capacités de survie individuelles. L'action des agents contribue à la performance collective qui en retour assure une meilleure survie des individus. Cependant, cet avantage impose des contraintes vis-à-vis des individus en limitant leur marge de manoeuvre.

4.3. Contraintes sociales et émergences de structures

De nombreuses structures émergent des interactions, et nous avons vu que ces structures sont nécessaires à la survie du groupe car elles amplifient leur capacité. Par exemple, la file des robots récupérateurs de minerai émerge simplement des interactions tendant à améliorer les performances du groupe. Mais ce sont ces structures qui, par l'effet d'une boucle de rétroaction sociale,

définissent des contraintes individuelles. En effet, les mécanismes de coopération, en améliorant les performances du groupe et en augmentant les capacités de survie des individus se traduisent par l'établissement d'un certain nombre de normes et contraintes sociales tendant à limiter l'éventail des comportements possibles d'un individu, et à l'intégrer dans une organisation sociale de plus en plus rigide. Par exemple, l'amélioration des performances par spécialisation des agents, comme dans le cas du système MANTA, entraîne un appauvrissement de leurs capacités de totipotence et contraint ainsi leur marge de manoeuvre. Ils deviennent alors plus dépendants des autres et donc de moins en moins capables de survivre seuls. La spécialisation les cantonne dans un rôle dans lequel ils peuvent de moins en moins se libérer, et dont ils deviennent de plus en plus dépendants. Les mécanismes sociaux mis en place pour assurer la viabilité du groupe restreignent encore les possibilités individuelles des agents en contraignant leurs comportements, et en les poussant à se socialiser encore plus, c'est-à-dire à devenir de plus en plus spécialisés et dépendants des autres. Il y a donc un effet de rétroaction positive entre l'accroissement de performance, l'augmentation de la survie individuelle et l'établissement de contraintes sociales tendant à limiter les possibilités individuelles d'action (fig. 5).

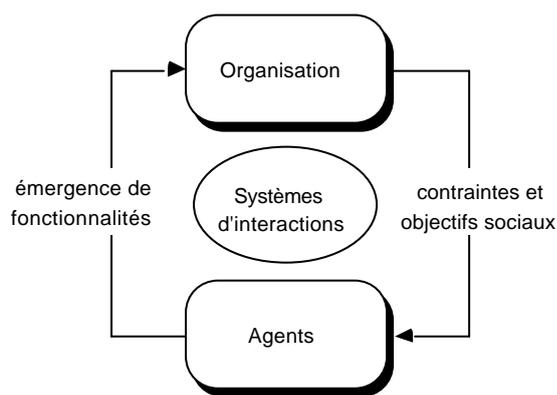


Figure 5. Les organisations émergent des interactions sociales entre individus et contraignent en retour leur comportement.

*

Nous avons étudié le phénomène de la coopération dans les systèmes multi-agents en essayant de le comprendre comme un système dans lequel les techniques de coopération favorisent l'augmentation des performances du groupe et donc la probabilité de survie individuelle. Ces techniques entraînent d'autres difficultés qui doivent être résolues par des méthodes de coopération telles que la coordination d'action, l'allocation des tâches et la résolution de conflits. Enfin, toutes ces méthodes produisent, par "effet de bord", des structures organisationnelles qui contraignent les comportements possibles des individus.

Jacques FERBER
LAFORIA
Université Paris 6

Bibliographie

- AXELROD R. (1992) *Donnant, Donnant. Théorie du comportement coopératif*. Paris, Editions Odile Jacob.
- BOURON T. (1992) *Structures de communication et d'organisation pour la coopération dans un univers multi-agents*. thèse d'université, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6).
- CONTE R., MICELI H. et CASTELFRANCHI C. (1991) *Limits and Levels of Cooperation: Disentangling Various Types of Prosocial Interaction*. In Yves Demazeau et Jean-Pierre Müller (éds), *Distributed A.I. 2*. North-Holland.
- CORBARA B. (1991) *L'organisation sociale et sa genèse chez la fourmi *Ectatomma Ruidum Roger**. Thèse d'université, Université Paris XIII.
- DAVIS R. et SMITH R.J. (1983) *Negotiation as a Metaphor for Distributed Problem Solving*. *Artificial Intelligence* 20 (1), pp. 63-109.
- DEMAZEAU Y. et MÜLLER J.-P. (éd.) (1991) *Decentralized AI 2*. Amsterdam, Elsevier North-Holland.
- DENEUBOURG J.-L. et al. (1993) *Self-organisation and life: from simple rules to global complexity*. *Second European Conference on Artificial Life*, Bruxelles.
- DENEUBOURG J.-L. et al. (1987) *Self-organisation mechanisms in ant societies (II): learning during foraging and division of labor*. In *From Individual Characteristics to Collective Organisation in Social Insects. Experientia Supplementum*, Vol. 54, J.M. Pasteels et J.-L. Deneubourg (éd.), pp. 177-196. Birkhäuser, Bâle.

- DENEUBOURG J.-L., GOSS S., SENDOVA-FRANKS A, DETRAIN C. et CHRETIEN L. (1991) *The dynamics of collective sorting robot-like ants and ant-like robots..* Jean-Arcady Meyer et Stewart W. Wilson (éd.) *From Animals to Animats*. MIT Press, pp. 356-363, Paris.
- DENEUBOURG J.-L. et GOSS S. (1989) Collective Patterns and Decision-Making, *Ecology, Ethology and Evolution* 1, pp. 295-311.
- DROGOUL A. (1993) *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents.* Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6).
- DROGOUL A. et FERBER J. (1992) *From Tom Thumb to the Dockers: Some Experiments with Foraging Robots.* In Jean-Arcady Meyer, Herbert Roitblat et Stewart Wilson (éd.) *From Animals To Animats: Second Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB 92)*, M.I.T. Press, Hawaii.

- DROGOUL A. et FERBER J. (1994) *Multi-agent simulation as a tool for studying emergent processes in societies*. In Nigel Gilbert et Jim Doran (éd.) *Simulating Societies: the computer simulation of social phenomena*, Vol. , pp 127-142. Londres, UCL Press.
- DURFEE E.H., LESSER V.R. et CORKILL D.D. (1987) Cooperation through communication in a distributed problem solving network. In Michael Huhns (éd.) *Distributed Artificial Intelligence*. Pitman.
- DURFEE E.H., LESSER V.R. et CORKILL D.D. (1989) *Cooperative Distributed Problem Solving*. In Avron Barr, Paul R. Cohen et Edward A. Feigenbaum (éd.), *The Handbook of Artificial Intelligence Vol IV*, pp. 83-148. Addison Wesley.
- ERCEAU J. et FERBER J. (1991) L'intelligence artificielle distribuée. *La Recherche*, Juin.
- FERBER J. (1994) *Reactive Multi-Agent Systems: Principles and Applications*. In Fundamentals of Distributed Artificial Intelligence, Vol. Nick Jennings (éd.), North Holland.
- FRESNEAU D. (1994) *Biologie et comportement social d'une fourmi ponerine néotropicale*. Thèse d'état, Université Paris XIII.
- GALLIERS J.R. (1991) *Modelling autonomous belief revision in dialogue*. In Yves Demazeau et Pierre Müller (éd.) *Decentralized Artificial Intelligence 2: Proceedings of the Second European Workshop on Autonomous Agents in a Multi-Agents World*, Elsevier Science Pub./North Holland.
- LAPIERRE J.W. (1992) *L'analyse de systèmes*. Paris, Syros.
- LIVET P. (1994) *La communauté virtuelle*. Paris, Ed. de l'éclat.
- MALONE T.W. (1988) *What is coordination theory*. National Science Foundation Coordination Theory Workshop, M.I.T.
- MIRIAD E. (1992) *Approcher la notion de collectif*. Actes des Journées Multi-Agents du PRC-IA, Nancy.
- STEELS L. (1989) *Cooperation between distributed agents through self organisation*. Journal of robotics and autonomous systems, MIT Press 6.
- STEELS L. (1991) *Towards a Theory of Emergent Functionality*. In Jean-Arcady Meyer et Stewart W. Wilson (éd.), *From Animals to Animats*, MIT Press, pp. 451-461, Paris.
- STEELS L. (1994) The artificial life roots of artificial intelligence. *Artificial Life*, MIT Press 1 (1).
- STOETZEL J. (1978) *La psychologie sociale*. Paris, Flammarion.
- THERAULAZ G., GOSS S., GERVET J. et DENEUBOURG J.L. (1991) *Task Differentiation in Polistes Wasp Colonies: a Model for Self-Organizing Groups of Robots*. In J. A. Meyer et S. Wilson (éd.), *From Animals to Animats*, pp. 346-354. Cambridge, MIT Press.
- WILSON E.O. (1971) *The Insect Societies*. Cambridge (Mass.), Belknap Press of Harvard University Press.

ZEGHAL K., FERBER J. et ERCEAU J. (1993) *Symmetrical, transitive and Recursive Force: A Representation of interactions and commitments*. IJCAI Workshop on Coordinated Autonomous Robots, Chambéry.