

nisation légale formée d'une microéconomie et d'une constitution. À cet effet, nous introduisons la notion d'intérêt matériel pour chaque robot. Trois principaux comportements d'économie de marché structurent le groupe : le partage rémunéré de capacités sensorielles, le partage rémunéré de la mémoire, enfin la négociation pour l'achat et la vente d'informations sur l'environnement. De son côté, la constitution, implémentée dans chaque robot, garantit la stabilité de la structure du groupe, qui peut être perturbée par les conflits issus des négociations.

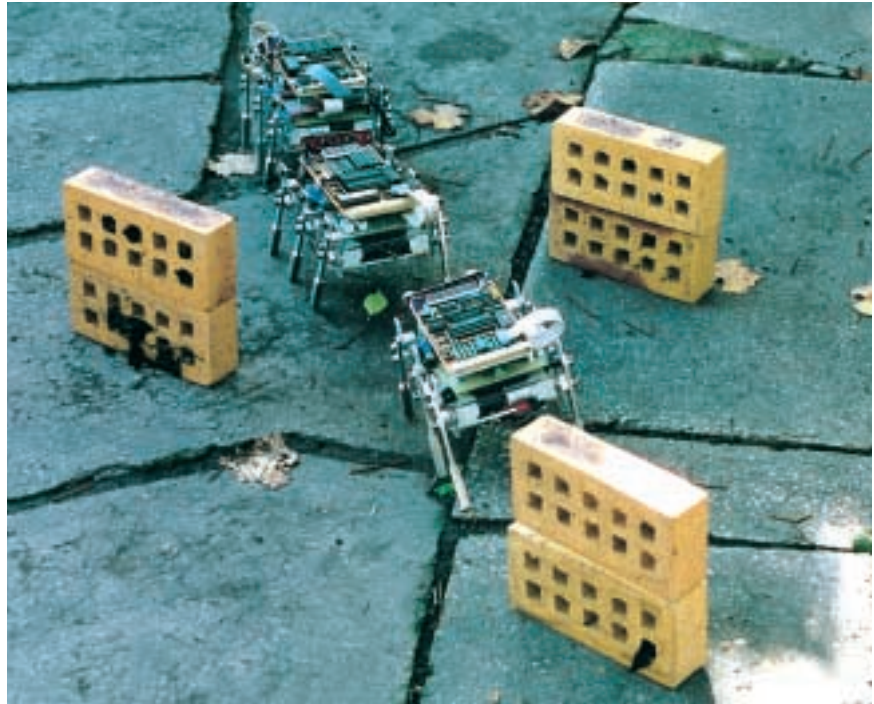
Les intérêts individuels et les intérêts collectifs

Le modèle microéconomique de coopération place chaque robot face aux autres membres du groupe comme producteur de ressource, ou comme consommateur. Lorsqu'un robot veut en recruter un autre pour une tâche donnée, les robots disponibles calculent leur fonction d'utilité : le gain d'énergie proposé par le robot recruteur, moins l'énergie nécessaire au robot pour se rendre sur le site de travail, moins l'énergie nécessaire à la résolution de la tâche (initialement, les robots ont leurs batteries électriques pleines, et ils sont payé en énergie électrique).

Si cette quantité est positive, l'action proposée est rentable. Si la fonction d'utilité est négative, l'action proposée n'est pas rentable, car la dépense d'énergie nécessaire pour satisfaire la demande est supérieure au gain. Si la fonction d'utilité est nulle, le choix d'accepter ou de refuser est aléatoire.

Cette minimisation des coûts de déplacement est également présente dans l'économie des transports urbains. Dans la plupart des grandes villes, les voyageurs ont le choix, pour se rendre à leur travail, entre les transports en commun et le véhicule individuel. Pour choisir entre les possibilités, chaque voyageur prendra en compte le temps de parcours, le temps d'attente et le coût. En attribuant une valeur à chacune de ces caractéristiques, il calculera une fonction d'utilité dont le résultat déterminera son choix. Pour un robot, l'évolution de la fonction d'utilité déterminera ses actions.

Ainsi, dans notre construction, la motivation personnelle de chaque robot est l'intérêt matériel. L'intro-



4. LES TROIS ROBOTS MARCHEURS coopèrent : dans un environnement couvert d'obstacles, le robot de tête met son sonar à la disposition des robots qui le suivent. Ces derniers économisent ainsi leurs ressources en énergie.

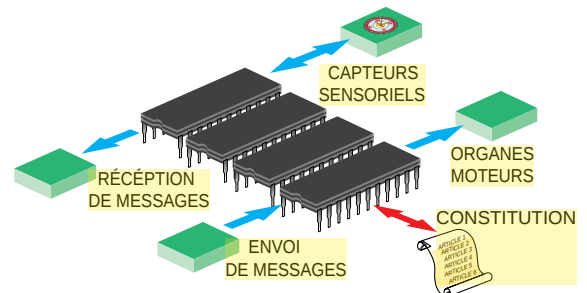
duction d'une économie dans une organisation collective régule la coopération, la division du travail et le partage des ressources entre les robots.

Avec pour motivation personnelle un enrichissement matériel, nous voyons apparaître des structures d'organisation collective : coalitions de robots pour la recherche du minerai, contrats entre robots pour le prêt et la location d'organes sensoriels, des contrats de services de robots pour d'autres robots contre une rémunération fixée après négociation, voire des quiproquos entre robots qui ne se comprennent pas bien.

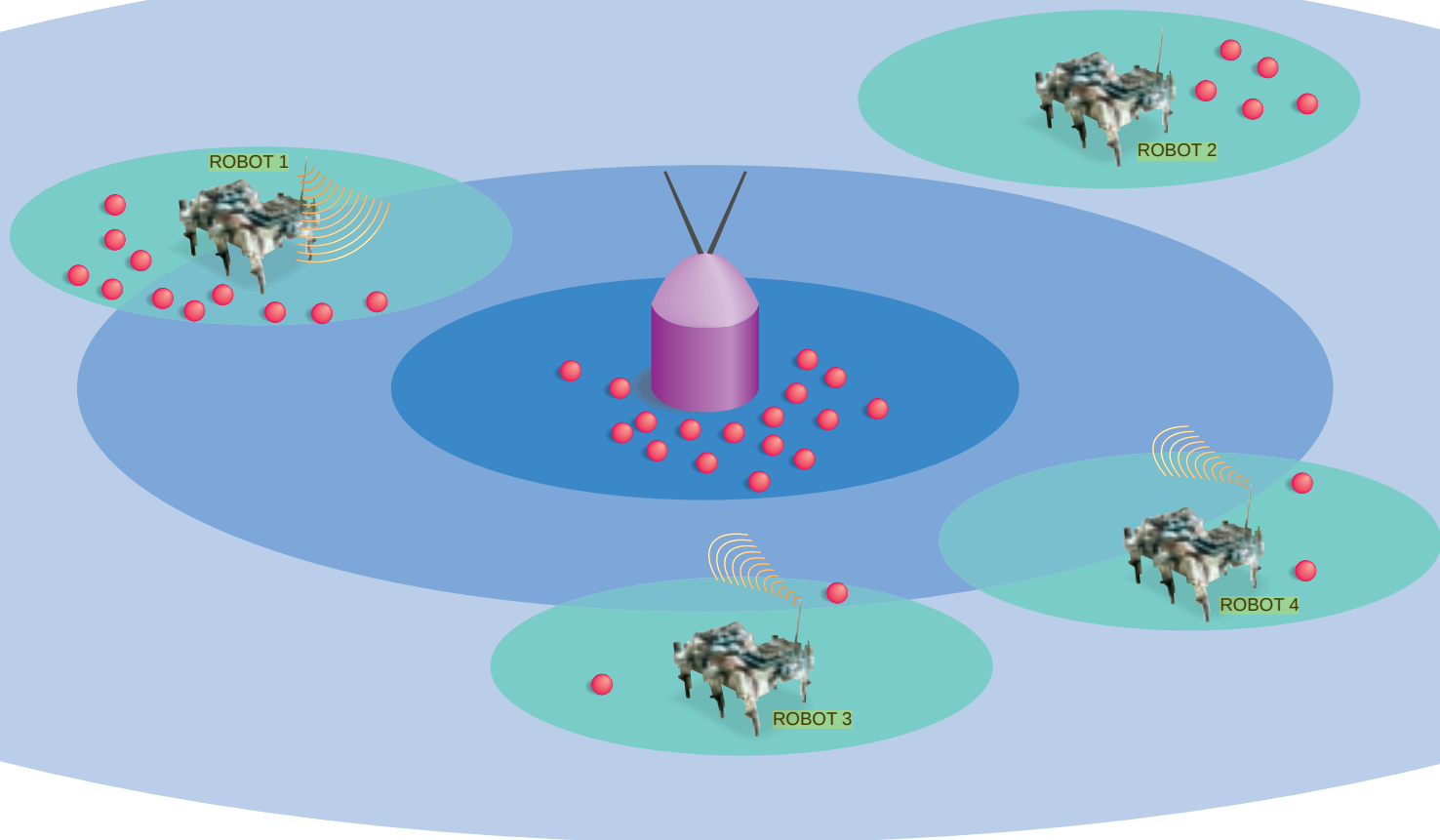
Certaines situations de coopération rencontrées sont analogues au dilemme du prisonnier. Dans ce dilemme, on interroge deux prisonniers sur la culpabilité de leur complice et l'«autorité» détermine la sévérité de leur peine selon leur réaction. Si tous deux coopèrent (ne dénoncent pas leur complice), l'autorité leur inflige une peine de prison de un an ; lorsque les deux trahissent (en se dénonçant), il se voient infliger chacun une peine de cinq ans ; quand l'un des prisonniers trahit, tandis

que l'autre coopère, le traître est libéré et l'autre est condamné à dix ans de prison. Les prisonniers doivent-ils s'entraider ou non ?

Imaginons la situation où l'un des robots trouve un gisement de minerai tellement important que, ne pouvant l'exploiter seul, il souhaite engager la totalité du groupe. Les robots disponibles calculent leur fonction d'utilité qu'ils transmettent au robot recruteur. Ce dernier calcule alors la fonction d'utilité du groupe qui est la somme des fonctions d'utilité individuelle des robots. Si cette fonction est positive, et si, individuellement, l'un des robots a une fonction d'utilité négative, ce der-



5. LE ROBOT MARCHEUR traite l'information à l'aide de quatre microprocesseurs. Ce sont eux qui font les calculs nécessaires aux négociations microéconomiques. En cas de conflit entre deux robots, la constitution embarquée par chaque robot (des petits programmes et des circuits logiques) est chargée de les départager.



6. LE TERRAIN D'EXPÉRIMENTATION est une zone de dix mètres de diamètre. Au centre, une balise de repérage auprès de laquelle les robots déposent le minéral ramassé. Les robots explorent leur environnement. Dans sa zone de prospection (*disque vert*), le robot 1 trouve plus de minéral qu'il ne peut en ramasser. Il émet alors un message pour recruter un robot. Deux robots (3 et 4) sont intéressés par l'offre (le robot 2 n'est pas intéressé, car il a du travail

dans sa zone de prospection). Si les robots 3 et 4 veulent tout deux répondre à l'offre, ils soumettent leur désaccord à la constitution (un ensemble de lois, embarquées par chaque robot). Celle-ci départage les robots sur des critères d'intérêt pour le groupe : par exemple, elle favorisera celui qui n'a pas travaillé depuis le plus longtemps afin qu'il puisse recharger ses batteries (les travaux sont rémunérés par de l'énergie électrique).

nier doit-il être pris en charge ou abandonné? Dans ce cas, la prise en charge est plus utile à la communauté que l'abandon : le robot abandonné est perdu pour la communauté, alors que soutenu, il peut aider au ramassage du minéral. Toutefois, la coopération peut entraîner des blocages.

La résolution des conflits

Lorsque plusieurs robots sont amenés à collaborer, donc à négocier, ils doivent à un certain moment arrêter de négocier. Cet arrêt peut être explicitement programmé après un temps donné, auquel cas on ne peut plus parler d'une négociation, dans la mesure où elle n'a pas abouti.

La seconde possibilité est que les robots s'arrêtent de négocier mutuellement, par exemple lorsqu'ils ont «conscience» d'avoir obtenu chacun le maximum dans la négociation. C'est là le nœud de la programmation d'un groupe de robots : comment un robot peut-il optimiser sa satisfaction?

Pour résoudre ces problèmes, nous avons décidé d'implémenter une

constitution – au sens politique du mot. Nous avons introduit deux premiers articles qui obligent les robots à protéger leurs existences, mutuellement et collectivement. Ces articles ressemblent à la troisième loi d'Asimov que nous avons évoquée en début d'article. Dans le cas où les robots sont chargés de ramasser du minéral, les six articles de notre constitution sont :

- Article un. Aucune action individuelle ou collective ne doit mettre le groupe en danger.
- Article deux. Aucune action individuelle ou collective ne doit mettre un membre du groupe en danger
- Article trois. Aucun robot ne peut fixer seul le prix officiel du minéral non ramassé.
- Article quatre. Un robot est libre de négocier le prix d'une ressource avec un autre robot.
- Article cinq. Pour réviser un règlement de la constitution, il faut que les deux tiers du groupe soient d'accord.
- Article six. La durée d'une négociation est limitée.

Seuls les deux premiers articles ne sont pas modifiables par les membres

du groupe. Les deux premiers articles interdisent à un robot ayant d'importantes réserves d'énergie de refuser son aide à un robot menacé (dont les batteries sont presque vides), dans la mesure où cela ne le met pas lui-même en danger.

Chaque robot embarque un exemplaire de la constitution. Si, lors d'une négociation ou d'un conflit, deux ou trois membres du groupe ne sont pas en mesure de s'accorder sur une action qui engage le groupe, chacun soumet localement à la constitution l'ensemble des propositions et des points de désaccord. Comme tous les robots ont la même constitution, le résultat de la soumission est identique, et les robots exécutent le résultat proposé. Chacun des articles composant la constitution est défini par des fragments de programmes de quelques lignes ou par des fonctions électroniques câblées directement sur le robot.

Examinons le cas d'un robot qui trouve un gisement de minéral dont il sait, par expérience et apprentissage, que deux robots suffisent à l'exploiter : il cherche alors à engager