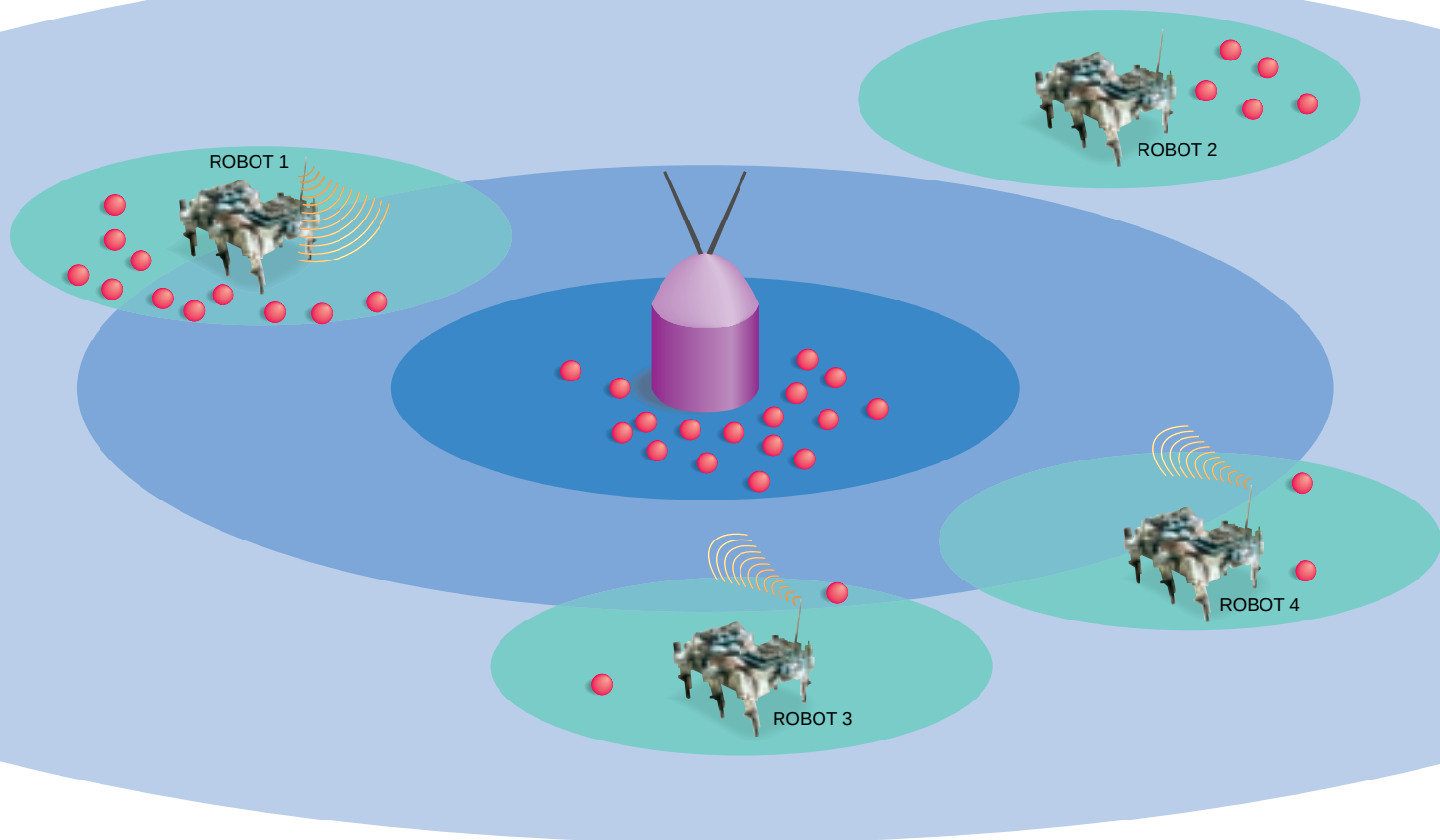




6. LE TERRAIN D'EXPÉRIMENTATION est une zone de dix mètres de diamètre. Au centre, une balise de repérage auprès de laquelle les robots déposent le minéral ramassé. Les robots explorent leur environnement. Dans sa zone de prospection (*disque vert*), le robot 1 trouve plus de minéral qu'il ne peut en 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, embarqués 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

un seul autre robot. Deux robots, 3 et 4, répondent à son offre. Chacun calcule sa fonction d'utilité. Le robot recruteur choisit alors la robot dont la fonction d'utilité est supérieure. Lorsque les deux fonctions d'utilité sont voisines, le robot recruteur a du mal à choisir, et les deux robots disponibles peuvent ne pas s'accorder. Les deux robots soumettent alors leur désaccord à la constitution.

Celle-ci vérifie que les fonctions d'utilité des robots est bien positive (sinon ils sont en danger) ; elle vérifie l'état des capteurs des deux robots (un robot peut avoir un capteur abîmé ce qui nuirait à son efficacité sur le terrain) ; enfin, elle examine si l'un des deux robots a moins travaillé que l'autre. Dans 99 pour cent des cas, la constitution résout ainsi les conflits en choisissant le robot le plus apte, pour le bien de la société. Lorsqu'à l'issue de cet examen, la constitution ne parvient pas à départager les robots, elle fait un choix aléatoire.

Dans notre expérience, les robots utilisés sont des robots à six pattes, munis d'un système de communication et d'un détecteur de minerai (voir la figure 3). Chaque robot connaît sa position par rapport à une base. Cette dernière n'est pas un organe central de contrôle, mais uniquement un repère fixe pour les robots mobiles. Nous avons analysé la quantité de minerai ramassé en fonction de plusieurs paramètres : le nombre de robots, et selon que le système de communication radio est connecté ou non (suppression du recrutement).

Conformément à nos attentes, la quantité de minerai ramassé augmente avec le nombre de robots du groupe : en passant de trois à quatre robots, le nombre d'échantillons de minerai ramassés après une heure de travail est passé de 16 à 28. En revanche, avec cinq robots, la quantité de minerai ramassé a légèrement diminué, car l'un des robots n'a rien trouvé et que le minerai était plus dispersé que dans les expériences précédentes.

Pourquoi faire des expériences alors que des simulations pourraient reproduire ce phénomène ? Parce que nos expériences sont plus « réelles » que les simulations. La simulation numérique est une forme particulière de l'expérience : elle revêt les apparences d'un système en reproduisant

L'intérêt individuel, moteur de la coopération

La capacité individuelle de survie d'un robot se définit, soit en considérant sa probabilité de survie dans un environnement donné, soit en analysant son bilan énergétique, c'est-à-dire la différence entre la quantité d'énergie qu'il reçoit et celle qu'il dépense, par unité de temps. Lorsque ce bilan est positif, le robot est capable de survivre et d'investir cette énergie dans la coopération.

Le modèle microéconomique de coopération place chaque robot face aux autres membres du groupe comme producteur de ressources ou comme consommateur. À chaque interaction, le robot calcule sa fonction d'utilité :

$$U_{\text{robot}} = \text{GAIN}_{\text{proposé}} - \text{ÉNERGIE}_{\text{déplacement}} - \text{ÉNERGIE}_{\text{résolution}}$$

où $\text{GAIN}_{\text{proposé}}$ est le gain d'énergie proposé par le robot recruteur ou offreur de service, $\text{ÉNERGIE}_{\text{déplacement}}$ l'énergie cinétique nécessaire au robot pour se rendre au site de travail et $\text{ÉNERGIE}_{\text{résolution}}$ l'énergie nécessaire à la résolution de la tâche.

- Si cette quantité est positive, l'action proposée est rentable pour le robot. Il peut l'accepter immédiatement s'il n'est pas en situation de mieux faire. Sinon l'offre est mémorisée par le robot pour une action différée, en accord avec le robot recruteur ou offreur de service.
- Si la fonction d'utilité est négative, l'action proposée n'est pas intéressante pour le robot, 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 la proposition est aléatoire.

une partie de son comportement ou de sa forme, mais sans en avoir l'ensemble des caractéristiques. Le modèle y est limité aux seules propriétés nécessaires pour mener à bien la tâche que l'on s'est fixé. Dans une expérience ordinaire, l'expérimentateur exerce une action immédiate sur l'objet étudié ; dans une simulation, ce contact n'existe pas : l'expérimentateur agit uniquement sur le modèle de l'objet.

Certes, la simulation est nécessaire lorsque l'expérimentation directe est impossible (impossibilité technique ou expériences trop longues). Le travail de simulation sur l'évolution des espèces, par exemple, justifie pleinement le choix d'une telle démarche. Toutefois, lorsqu'une réalisation demeure possible, pourquoi essayer de reproduire imparfaitement un environnement dont nous disposons sachant que, de toute manière, il n'est pas possible de reproduire pleinement ce milieu ?

Dans la réalité, les robots se fatiguent : après quelques heures, l'un des robots se déplaçait mal, en raison d'une surchauffe de moteur et du frottement de deux pignons. Ce pro-

blème de fatigue, voire de panne du robot, n'est pas pris en compte dans des simulations.

Constitution nécessaire

Peut-on obtenir un comportement efficace, analogue à celui que nous avons observé, sans l'introduction d'une constitution ou d'une notion d'économie ? Selon nous, une organisation sociale, même artificielle, doit être régulée ; sinon les conflits sont inévitables. Dès lors qu'il y a communication, coopération et négociation, les outils économiques sont indispensables. Dans d'autres réalisations d'intelligence artificielle, ces mécanismes de régulation portent des noms différents, mais ils s'inspirent également de mécanismes économiques, qui seuls peuvent gérer les relations de dépendance complexe dans un système d'interaction collective.

La microéconomie étudie le comportement d'individus rationnels, dans un environnement où toute l'information n'est pas disponible et où les décisions individuelles ne sont pas coordonnées par une autorité centrale. La microéconomie reconnaît que la

concurrence parfaite est une référence abstraite qui ne peut avoir de valeur normative, car les échanges de biens sont inévitablement soumis à des coûts de transaction et à des défauts de coordination. Ainsi, les marchés ne fonctionnent jamais selon l'hypothèse de la concurrence parfaite.

L'analyse des comportements de nos robots dans certaines situations nous a permis de déceler des sources systématiques d'inefficacité de transaction marchande (comportement égoïste, par exemple). Si notre société de robots fonctionne, c'est parce que nous l'avons dotée d'une constitution qui pallie ces lacunes en maintenant la cohésion du groupe.

L'économiste écossais Adam Smith (1723-1790) prétendait que, si chaque agent économique améliore sa situation, la situation du groupe est améliorée. Contrairement à cette intuition, la microéconomie montre que les décisions individuelles égoïstes sont le plus souvent incompatibles avec l'intérêt général. En l'absence de coordination, les individus font des choix qui impliquent un gaspillage de ressources.

Dans les années 1970, l'éthologue Nicholas Humphrey écrivait que l'intelligence des animaux et celle de l'homme résulteraient d'une adaptation, non aux vicissitudes de l'environnement physique (intelligence physique), mais aux contraintes de l'environnement social et à la nécessité de maintenir la cohésion du groupe auquel on appartient (intelligence sociale). Selon cette conception, l'intelligence sert essentiellement à préserver la structure d'un groupe, malgré les tendances individuelles à l'exploitation et à la manipulation des autres. Dans cette mesure, notre groupe de robots est intelligent.

Arab ALI CHÉRIF est chercheur au Laboratoire d'intelligence artificielle de l'Université Paris 8 (Saint-Denis). Il enseigne la robotique à la formation MIME de cette université.

R. TANGUY, *Coopération et coordination des robots autonomes*, Colloque IAC, Université Paris 8, février 1997.

J.-P. DELAHAYE, *Logique, informatique et paradoxes*, Bibliothèque Pour la Science, 1995.

D. BLAIR, *La logique du choix collectif*, in *Pour la Science*, octobre 1983.

L'INTELLIGENCE



L'intelligence en sciences



L'intelligence en physique

PIERRE-GILLES DE GENNES

Comment devenir un bon physicien? Chaque nouveau problème apporte son lot de difficultés. Le physicien théoricien a besoin d'intuition et de chance pour naviguer entre le Charybde du formalisme excessif et le Scylla de l'expérimental inextricable.

La préoccupation centrale est la recherche de modèles simples qui décrivent les phénomènes. Attention : le modèle utile n'est pas nécessairement unique. Ainsi, dans les années 1950 s'est posée la question du comportement des noyaux atomiques dans un champ magnétique. Le groupe d'Edward Purcell, à l'Université de l'Illinois, a tout fondé sur les niveaux d'énergie du proton dans un champ magnétique : leur position, leur largeur, etc. À l'Université Stanford, Felix Bloch procéda très différemment : il assimila le spin (ou moment magnétique) des atomes à un petit gyroscope soumis à des couples qui le faisaient précesser (la précession d'une toupie est la rotation de son axe de rotation) et retrouva les résultats de Purcell. Toutefois son modèle lui donnait beaucoup plus : il décrivait les mécanismes transitoires, qui ont ensuite été utilisés pour la mise au point des techniques de résonance magnétique nucléaire. Au total, deux modèles très différents d'une même réalité.

L'étude des polymères nous a montré, aussi, que le bon choix des modèles est parfois conjoncturel. Les polymères sont composés de très longues molécules ; un matériau composé de polymères à l'état fondu, ressemble à un plat de spaghettis enchevêtrés. Comment calculer son comportement? Samuel Edwards, à l'Université de Cambridge, avait remarqué que les polymères faisaient des nœuds, et il avait utilisé la théorie mathématique des nœuds pour déterminer les propriétés physiques des polymères fondus. Bien qu'intéressante, cette approche fut peu féconde.

Plus tard est apparue une description différente, qui considère que chaque chaîne est un serpent qui ondule dans un tube étroit, autour de sa position initiale ; c'est la théorie de la reptation. On comprend aujourd'hui que la description en termes de nœuds était limitée pour plusieurs raisons : premièrement le problème

de la classification des nœuds est un problème mathématiquement inachevé ; deuxièmement les nœuds mathématiques exigent des fils infiniment longs ou refermés sur eux-mêmes, contrairement aux molécules de polymères, qui sont de longueur finie ; enfin c'est la façon de défaire les nœuds qui détermine la dynamique des matériaux polymères.

Au total, le physicien passe une bonne partie de son temps à tester des représentations. Il fait souvent de mauvais choix, mais, parfois, ceux-ci lui donnent des idées pour progresser : on modélise avec les bonnes idées, mais les brouillons sont utiles.

Dans la physique que je rencontre, les idées viennent rarement comme des éclairs divins. Les nuits de Pascal sont exceptionnelles, et les maturations sont lentes. Voici un exemple : la description des solutions de polymères au contact d'une surface solide. Ce problème est important, car les solutions de polymères contenant des particules solides sont omniprésentes : le blanc d'œuf est une solution de polymères ; un pot de peinture contient des pigments et des polymères.

Les physico-chimistes avaient lentement déterminé les particularités de l'absorption des polymères sur les surfaces, et les physiciens théoriciens avaient modélisé l'ensemble des données. Toutefois il fallut encore dix ans de réflexion pour qu'apparaisse le modèle qui éclaire vraiment le problème : on assimile le polymère à une grille dont la maille est de plus en plus serrée quand on se rapproche de la surface. Ce modèle permet l'explication quantitative d'une foule de phénomènes. Il a permis d'obtenir une vision simple. Nous avons eu de la chance.

Le formalisme est parfois un danger (aggravé par l'informatique) : il permet de décrire les phénomènes dans trop de détails, au détriment de la compréhension profonde. Le physicien doit ignorer certains détails. Dans le cas des polymères au contact des surfaces, par exemple, on cherche une représentation qui ne fasse pas intervenir les particularités chimiques des molécules de polymère et des surfaces ; on regarde seulement les formes globales. En revanche, si l'on veut cor-

rectement résoudre le problème technique de recouvrir une surface solide d'une couche de polymères isolants, par exemple, on devra se préoccuper de la structure tridimensionnelle des chaînes et de leurs liaisons éventuelles avec les molécules de la paroi : ces propriétés dépendront de la constitution chimique précise des chaînes.

Je tiens à insister sur le travail à effectuer : le physicien ne se contente pas de rêver à une solution jusqu'à ce qu'elle vienne. Pour obtenir une description simple des phénomènes physiques, il doit avoir une solide culture : celle-ci s'acquiert lentement, laborieusement. Bloch, par exemple, n'a comparé le spin atomique à un gyroscope que grâce à sa connaissance fine de la mécanique quantique et, notamment, du travail de Julian Schwinger, de l'Université Harvard. On ne trouve pas de bonne analogie quand on n'est pas guidé par des mathématiques puissantes.

C'est notamment pour cette raison que je recommande souvent aux étudiants français d'utiliser le cours de Lev Landau, assez mathématique, plutôt que le cours de Richard Feynman. Ce dernier est plus profond que le texte de Landau, mais il s'adresse à des personnes qui ont déjà assimilé le formalisme.

Peut-on devenir «intelligent»? Il ne s'agit pas d'être malin : la rapidité d'esprit à la française, la «pointe» de Cyrano de Bergerac, me semble nuire à nos étudiants, qui oublient alors parfois de creuser les sujets. Je crois beaucoup à l'échange d'idées, mais cet échange ne doit pas se transformer en duel intellectuel ; il n'est fructueux que s'il est une invitation à une réflexion ultérieure. Personnellement, je dois beaucoup à Feynman que je n'ai jamais rencontré, mais dont j'ai lu très tôt deux articles sur la superfluidité de l'hélium. Ces articles qui contenaient peu d'équations, m'ont plus appris, par leur style, que des années d'étude. Les enseignants ne devraient-ils pas faire lire des articles de ce genre à tous les étudiants?

Ce serait en tout cas une contribution à l'élaboration de cette culture. L'inculture est redoutable : il est naïf de croire que n'importe qui peut trouver