

Dominique LESTEL, Benoît GRISON, Alexis DROGOUL

## **Les agents réactifs et le vivant dans une perspective d'évolution coopérative\***

### *1. Une modélisation sans mathématiques*

La biologie théorique des trente dernières années s'est excessivement focalisée sur la *modélisation mathématique*, en pensant y trouver un outil conceptuel puissant. A l'exception de domaines restreints (comme les systèmes non-linéaires en écologie), les résultats n'ont pas confirmé les espoirs placés dans cette approche (Mayr, 1986). Dans ce contexte, la modélisation en intelligence artificielle constitue une alternative qui est susceptible de renouveler un certain nombre de problématiques de biologie théorique. Cette dernière a circonscrit un grand nombre de problèmes importants pour caractériser le vivant, mais sans disposer des outils adéquats qui permettraient de les traiter de façon satisfaisante. Il n'est pas absurde de postuler que l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) laisse entrevoir la possibilité d'en obtenir certains dans un avenir proche. Des auteurs comme D. Lenat (Davis et Lenat, 1981 ; Lenat, 1983) ont sans doute compris la relation qui lie l'Intelligence Artificielle à la biologie, mais leur approche est restée primitive. D.Lenat pensait que l'évolution pouvait être modélisée par les techniques de l'Intelligence Artificielle disponibles aux débuts des années quatre-vingt, sans avoir conscience que beaucoup de procédures de l'évolution restent encore obscures. L'IAD, au contraire de sa branche plus classique,

---

\* Nous remercions C. Lenay, J. Ferber et B. Victorri pour leurs suggestions et remarques.

a les moyens de s'intéresser aux processus eux-mêmes ; elle n'a pas besoin de postuler l'existence d'entités *a*

*priori* très développées. Et, contrairement aux tendances néo-connexionnistes, elle n'a pas non plus besoin de se limiter à des unités aveugles uniquement capables des actions les plus élémentaires. Elle se donne les moyens de *penser les situations intermédiaires*, et c'est là que réside sa force. Elle n'éprouve nullement le besoin de se placer d'emblée à un niveau opératoire donné, mais elle se laisse au contraire la possibilité de passer d'un niveau à l'autre, au gré du contexte.

La branche de l'IAD qui traite de la simulation, habituellement appelée *simulation multi-agents*, est généralement utilisée dans des domaines composés d'entités aux comportements différents et difficilement traduisibles en termes purement quantitatifs. Son approche première est de considérer que la modélisation d'une situation globale est la résultante de la modélisation de chacune des entités qui la composent. L'intérêt est de pouvoir marier, au sein d'une même modélisation, des paramètres quantitatifs (données numériques, comme l'âge d'un individu, son salaire, etc.) et qualitatifs (les comportements individuels face à une situation donnée, par exemple). Pour y parvenir, chaque entité individuelle de la situation réelle est représentée dans le modèle par un agent, c'est à dire un processus informatique autonome capable de mettre en oeuvre certains comportements en réponse à des stimuli ou des communications provenant d'autres agents. Dans la mesure où aucune méthodologie globale de simulation multi-agents n'a encore vu le jour, il existe à peu près autant de modèles d'agents que d'applications de simulation. Néanmoins, il est possible de distinguer deux embranchements distincts qui résultent, semble-t-il, de deux conceptions encore irréductibles : le premier part du postulat qu'un comportement collectif "intelligent" ne peut provenir que d'actes de coopérations entre entités individuellement intelligentes. Fidèle à la ligne anthropomorphe de l'Intelligence Artificielle, il se base sur le développement d'agents dits "cognitifs". Son champ d'application réside essentiellement dans les simulations réalisées en psychologie cognitive (Castelfranchi et Conte, 1992) et en sociologie actionniste (Doran et al., 1992).

Le second domaine, qui apparaît comme le plus fécond à l'heure actuelle, et dont il sera essentiellement question dans la suite de cet article, est celui des agents "réactifs", qui prend le contre-pied de l'Intelligence Artificielle en tentant d'obtenir des comportements collectifs de haut niveau grâce à des interactions d'agents les plus simples possibles. Beaucoup de ses travaux s'intéressent aux notions d'émergence ou d'auto-organisation et se retrouvent ainsi proches des travaux effectués dans le domaine voisin de la Vie Artificielle. Ce faisant, nous assistons dans ce champ scientifique, d'un point de vue épistémologique, à une transition intéressante pour l'IA, qui la fait passer d'une métaphore psychologique à une métaphore biologique de l'intelligence. Elle se donne ainsi la possibilité de simuler des phénomènes biologiques jusque-là difficilement accessibles à ses outils théoriques. Nous nous intéresserons, dans cet article, à ce qui est susceptible de rendre cette seconde approche très féconde pour penser la dynamique du vivant.

## 2. *Évolution sélective vs. évolution coopérative*

L'IAD fournit des outils conceptuels qui permettent d'envisager sous un angle inédit certaines questions évolutives que les biologistes ont les plus grandes difficultés à aborder, comme les problèmes récurrents posés par la notion de *sélection naturelle*. Les biologistes passent trop rapidement de l'hypothèse que seuls survivent ceux qui sont aptes, à celle que *seuls les plus aptes* survivent. Pourquoi les *plus aptes* ? Il n'est pas absurde de considérer que les biologistes n'ont pas d'outils conceptuels suffisamment puissants pour penser l'*élimination des inadaptés*<sup>1</sup> (Pour une réflexion critique assez proche de la nôtre sur les difficultés conceptuelles du néo-darwinisme, cf. Varela, Thompson et Rosch, 1991). Dès la fin des années 60, le botaniste et généticien

---

<sup>1</sup> Dans le darwinisme classique, la sélection des plus aptes renvoie *ipso facto* à l'élimination des moins aptes. Dans le cas de l'élimination des moins aptes, les plus aptes restent de surcroît ; la cause de la sélection est la mort, non la reproductibilité. Un organisme disparaît parce qu'il meurt, non parce que son taux de fécondité est faible.

des populations Kimura (Kimura 1968, 1983) est confronté au polymorphisme inhérent à toute population viable d'organismes, et exhorte les spécialistes de l'évolution à renoncer au concept imprécis de "valeur sélective" d'un caractère. Kimura considère que l'on peut rendre compte du processus évolutif par des *mécanismes stochastiques*, tous les gènes ayant peu ou prou la mêmes "valeur sélective", à l'exception de formes allèles létales ou vraiment très avantageuses. La sélection ainsi conçue est donc anti-darwinienne, à fonction négative d'élimination. La position actuelle de Kimura s'est, il est vrai, légèrement modifiée : il admet aussi le rôle décisif, à côté d'une grande majorité de mutations neutres, d'un nombre restreint de mutations positives. Mais même sous cette forme, le "*neutralisme*" demeure un modèle de l'évolution trop réducteur, démenti sur certains points par plusieurs études expérimentales (Pasteur, 1974). Il garde néanmoins le mérite de souligner les failles du point de vue "sélectionniste" du Néo-Darwinisme (alors même que l'histoire de la vie en montre clairement les limites). On peut ainsi citer quelques problèmes marquants posés par l'Histoire Naturelle :

a/ Durant la Biogenèse, la sélection semble avoir joué un rôle négligeable dans l'édification des premiers systèmes vivants auto-organisés. Les travaux de thermodynamique du vivant, notamment ceux qui concernent les structures dissipatives l'indiquent sans ambiguïté (Buvet, 1974 ; Eigen, 1979 ; Kuhn, 1983 ; Brack et Raulin, 1991).

b/ L'allongement des chaînes trophiques avec l'apparition des protozoaires prédateurs (-1,5 milliards d'années) catalyse le développement de la Biodiversité (l'"effet de moisson", Grison, 1994). On peut fournir des modèles d'intelligibilité de cette dernière en termes de *réseaux trophiques coopératifs*.

c/ Le passage au palier pluricellulaire (-1 milliard d'années environ) est une étape cruciale de l'évolution, qui rend sensible la nécessité de *phénomènes de symbiose* dont on sait désormais qu'ils sont associés à des *transferts horizontaux de gènes*. L'importance

de la symbiose, soulignée par les travaux de l'équipe de Lynn Margulis (Margulis et Fester, 1991) n'est pas prise en compte dans le cadre d'une théorie qui attribue une importance décisive à la sélection (Grison, en préparation).

d/ L'évolution des fonctions cognitives vers une complexité croissante n'est pleinement compréhensible que si l'on tente d'appréhender comment les modifications morphologiques et les comportements s'affectent mutuellement (Edelman, 1992). Dans le cas de l'hominisation par exemple, l'accent a trop été mis sur l'encéphalisation au détriment de l'évolution de l'architecture locomotrice : la bipédie apparaît d'après de récents travaux comme un mode de locomotion archaïque chez les primates, qui précède nettement la cérébralisation croissante des premiers hominoïdes (Leroi-Gourhan, 1983 ; Sakka, 1990).

En écophysiologie comparée, l'importance évolutive des *fonctions de relation* apparaît nettement (Turquier, 1989 et 1994). Plus généralement, il est clair qu'elles ont un rôle crucial à jouer dans la conceptualisation phylogénique du vivant. Lorenz (1965 : 67) se demande d'ailleurs "si dans l'ordre des propriétés du vivant, on ne devrait pas faire passer les facultés d'acquisition d'information en premier". L'approche multi-agents est donc susceptible de fournir des débuts de solutions aux difficultés sur lesquelles achoppent les paradigmes de l'évolution.

L'IAD permet pour la première fois de modéliser l'évolution de la Biosphère en terme de *coopération*, et non plus en terme de *sélection*. Elle suscite ainsi des modèles d'intelligibilité alternatifs à ceux de la *sociobiologie* et de la *théorie des jeux*. La première, en effet, n'envisage la coopération (l'altruisme) que comme l'expression de préférences génétiques et la seconde ne dit rien de ces processus de coopération, qui restent en dehors de sa sphère de compréhension ; elle est d'abord et avant tout une *théorie du conflit*. La coopération n'est envisagée dans ces deux modèles que par rapport au conflit (qui se traduit en sociobiologie par des comportements d'agressivité et de dominance), et dans la perspective du conflit — ce qui en réduit singulièrement la portée. Elle est conceptualisée négativement comme l'inverse du conflit.

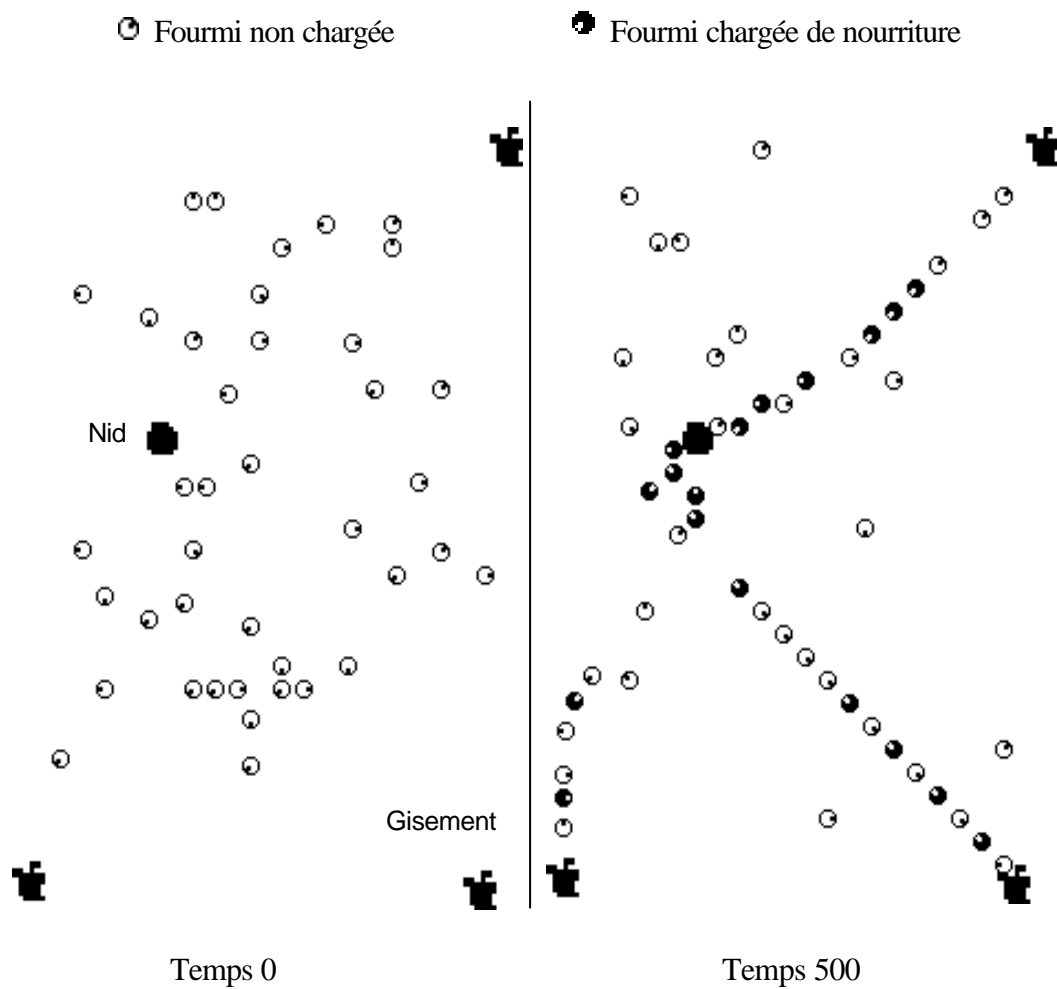
L'IAD est au contraire basée sur un ensemble de théories de la coopération qui ne doivent rien *exclusivement* au conflit (qui peuvent même systématiquement chercher à l'éviter, par l'intermédiaire de la *fonction de fuite*, J. Ferber, 1989). Dès lors que le processus de sélection est perçu comme ayant une importance moindre dans l'explication des mécanismes évolutifs, le caractère heuristique de la théorie des jeux s'en trouve affaibli d'autant.

### 3. *Les processus de chaîne comme exemple*

La modélisation en termes d'agents réactifs rend disponibles et opératoires des outils précieux. Des cas où des processus *adaptatifs, simples, efficaces et économiques* ne sont pas utilisés dans le monde vivant peuvent ainsi être imaginés et trouvés. L'exemple des *chaînes* qui découle directement des travaux de Ferber et Drogoul (1992) est intéressant de ce point de vue, puisqu'on a avec lui un processus économique et fiable vers lequel tendent rapidement les simulations mais dont on ne trouve en apparence aucune occurrence dans le monde animal (voir également l'article de Jacques Ferber dans le même numéro). Une telle situation soulève de nombreuses questions qui attendent encore des réponses. Soit des fourmis fictives, sortes de petits robots simplifiés, qui n'ont d'existence que sur l'écran de l'ordinateur : elles se dispersent rapidement sur le terrain pour chercher de la nourriture et s'organisent en chaîne pour faire circuler cette nourriture de son emplacement au nid. Au bout d'un temps donné, la chaîne revêt sa configuration optimale et se stabilise. Les fourmis ne bougent alors plus, et seule la nourriture est en mouvement, allant de la source au nid en passant par chaque fourmi, comme un électron à travers des molécules de métal pour reprendre une analogie due à Ferber.

Concrètement, dans un tel procédé, l'acteur n'est plus la "fourmi" mais la "nourriture". Mais pourquoi des fourmis réelles, du genre *Atta* par exemple, qui véhiculent individuellement des feuilles sur des kilomètres, parfois, n'utilisent-elles pas ce mode de transport ? Cette procédure semble également absente dans d'autres groupes zoologiques, sociaux ou à tendances grégaires. Des processus similaires, à un niveau plus abstrait, sous forme de signaux par

exemple, ne sont naturellement pas à exclure. Certaines manifestations, comme les vocalisations en cascade de bandes de batraciens lors de leurs périodes reproductrices, pourraient même recevoir une explication inédite, alors qu'elles restent inexplicables jusqu'à présent. Le modèle épidémiologique, souvent évoqué, n'est pourtant guère satisfaisant. Un modèle de chaîne serait-il plus approprié ? De même, en embryologie, il est possible de se demander dans quelle mesure l'*épigenèse des structures* est envisageable comme un processus en chaîne, qui mettrait en jeu des chaînes, des surfaces non-linéaires... A l'appui de cette proposition, nous prenons deux exemples tirés des travaux de l'embryologie moléculaire, pratiqués sur le modèle insecte.





Lors du processus de segmentation chez la drosophile, les synthèses autocatalytiques "en cascade" de protéines signaux régulatrices (telle la protéine bicoid) répercutées par les cellules alignées sur l'axe antéro-postérieur de l'embryon, échappent à la modélisation en termes de gradient chimique classique (Nüsslein-Volhards et al., 1987). De même, durant l'organogenèse des pattes de la blatte, la constitution du tissu épidermique suit une règle d'intercalation (Lewis, 1981). Pour former une portion d'épiderme, il suffit de la présence de deux cellules pré-cutanées plus ou moins distantes, définissant l'axe général d'orientation du développement sur le site de la future structure. Il s'établit d'abord une communication chimique entre les deux cellules initiales et les autres cellules pré-épidermiques proliférant dans diverses directions en position intermédiaire. Puis, les cellules proliférantes se disposent en ligne à mi-chemin des deux pôles cellulaires princeps jusqu'à atteindre les valeurs de position optimales, nécessaires à l'obtention de la configuration tissulaire caractéristique. Les échanges de signaux chimiques entre les cellules de l'ensemble se poursuivent alors, contribuant à la maturation histologique.

#### ***4. La maîtrise des acteurs en jeu dans un processus : importance du processus sur l'objet***

La modélisation offerte par l'IAD aide le biologiste à déterminer les acteurs à prendre en compte dans la conceptualisation d'un phénomène. Les biologistes ont trop souvent considéré que la théorie de l'évolution était un processus qu'ils pouvaient appréhender par la seule étude du vivant — que ce soit à un niveau spécifique ou organismique au XIXe siècle, ou à un niveau génétique, moléculaire et populationnel au XXe siècle. Quelques chercheurs dont Joseph Needham (1943) ont pourtant très tôt insisté sur l'importance de la notion de *rappports organisateurs*. De fait, l'IAD offre la possibilité de s'intéresser au moins autant aux *agencements* qu'aux *objets*. La biologie théorique peut désormais apprendre à travailler avec l'idée que le statut des objets est problématique, et qu'atteindre les plus pertinents pour un objectif fixé est loin d'aller de soi. L'objet du biologiste ne doit plus être

considéré comme un objet donné (la cellule, la fourmi, le gène, etc.) mais le biologiste doit considérer plutôt des *agencements d'objets dans des situations précises*. Il est raisonnable de faire l'hypothèse que les outils fournis par l'IAD lui permettront tout simplement d'effectuer des coupes transversales dans des domaines de la biologie qui ne sont distingués les uns des autres que par les effets pervers d'une tradition historique dont l'inertie reste considérable. L'émergence fonctionnelle d'une organisation d'agents réactifs paraît être un agencement de ce type : on le retrouve en éthologie des insectes comme en hématologie, en immunologie comme en embryologie. Dans le cas présent, l'objet en cause — cellule ou insecte — est moins important que le processus dont il est partie prenante.

A titre d'exemple, deux simulations multi-agents de processus biologiques, la première qui a porté sur la genèse des structures sociales — division du travail, polyéthisme d'âge — au sein d'une colonie de fourmis *Ectatomma Ruidum* (Drogoul, 1993), la seconde sur les divisions cellulaires intervenant au cours de l'hématopoïèse (Tabourdeau et Ferber, 1993), sont nées de la volonté des biologistes de comprendre comment des processus ontogéniques distincts pouvaient générer des régulations sociales complexes de nature proche, mais également, et peut-être surtout, de la possibilité que leur a offert l'IAD réactive de *modéliser* ces processus individuels et de *simuler* les processus sociaux afférents en utilisant des outils théoriques, expérimentaux et conceptuels similaires. De cette façon, l'IAD réactive devient un outil de simulation très performant pour des chercheurs en biologie qui sont confrontés à des phénomènes auto-organisationnels, quelque soit leur domaine d'application. Nous faisons le pari que des domaines comme la sociologie ou l'économie, confrontés eux aussi à des phénomènes non-linéaires difficilement modélisables de manière mathématique, sauront profiter de cet outil et qu'une nouvelle science de l'organisation (la *kénétique*, comme l'a récemment proposé J. Ferber ?) prendra son essor en transcendant les divisions scientifiques actuelles.

### 5. *Des questions qui attendent encore une investigation sérieuse*

Un certain nombre de questions qui nous paraissent importantes ne semblent pas avoir suscité d'investigation vraiment sérieuse de la part des biologistes, parce qu'elles ne semblaient pas pertinentes ou parce que les outils conceptuels et pratiques manquaient pour les aborder de façon féconde. Citons-en quelques-unes :

a/ Nous n'avons pas trouvé de recherches systématiques sur *les processus de transport chez le vivant*, dans une perspective phylogénique et ontogénique : qui transporte quoi, quand et comment ? L'usage des outils chez les animaux n'a été abordé que récemment, et de nombreuses surprises sont à attendre de ce côté.

b/ De la même manière, il serait intéressant d'étudier de manière plus approfondie *les processus de construction*, aussi bien chez les animaux eusociaux (fourmis, termites, abeilles) ou sociaux (castors, rongeurs en tout genre) que chez les animaux solitaires (oiseaux, par exemple). Dans le cas des animaux sociaux, la construction d'un nid ou d'un terrier permet en effet à la population constructrice de structurer son espace et, par là même, d'agir sur la répartition spatiale de ses membres. Quelle est l'influence de cette répartition sur sa structure sociale ? A une organisation topologique donnée correspond-il une et une seule organisation sociale ? Dans quelle mesure le processus de construction et le processus de socialisation s'affectent-ils mutuellement ? Enfin, pourquoi certains animaux ne construisent-ils pas ?

c/ Quel est le rapport du vivant à la *disparition* ? Les animaux développent un très grand nombre d'interactions avec des congénères. Lorsque l'un d'eux disparaît (par exemple par décès) que se passe-t-il ? Il s'établit un vide dans le réseau d'interaction de l'animal, et comment l'animal y pallie-t-il ? A quelles stratégies recourt-il ? Il existe ainsi des observations intéressantes de D. Fresneau et J.-P. Lachaud (communication personnelle) sur le rôle potentiel des cadavres chez les fourmis. On sait aussi depuis

longtemps déjà (Zuckerman, 1932) que les babouins traînent les cadavres pendant plusieurs jours ; à quelles raisons animales obéissent-ils ainsi ? Peut-on conceptualiser les processus de régénération chez les oursins ou les étoiles de mer (échinodermes) comme intermédiaires entre ceux de la sociotomie et de l'embryogénèse ? Certains mammifères semblent par ailleurs avoir une "conscience" de la disparition : ils s'éloignent quand ils "sentent" la fin approcher ; que signifie un tel comportement ?

d/ Le problème du *rapport à soi* nous semble extrêmement important. Quelles sont les relations que l'animal entretient avec lui-même ? Là encore, les recherches sur ce sujet sont quasiment inexistantes (les expériences de Gallup (1970) ne sont pas vraiment satisfaisantes). Nous faisons l'hypothèse qu'une classification des animaux pourrait s'établir à partir de ce critère, les animaux les plus complexes étant ceux qui ont développé les rapports à soi les plus performants. Avec une conséquence ultime : la cognition est l'aboutissement d'un processus particulier de rapport à soi (les étapes successives de l'évolution humaine constituent d'ailleurs une illustration de cette idée).

e/ De la même manière, le problème du *rapport à la société* chez les animaux sociaux n'a pas été réellement développé de façon satisfaisante. Quelle représentation se fait un animal de son groupe ou de sa colonie ? Comment parvient-il à se situer dans une hiérarchie, au sein d'une caste ? Certains travaux, essentiellement en primatologie, ont montré que quelques espèces se montrent capables d'intérioriser des relations sociales complexes (notamment les relations familiales). A l'inverse, la simulation d'une colonie de fourmis *Ectatomma Ruidum*, évoquée précédemment, a montré qu'il n'était nul besoin pour un individu d'être conscient de la structure sociale à laquelle il appartenait pour pouvoir s'y intégrer pleinement.

f/ *Les types de rapports qu'un vivant entretient avec les autres* sont également sous-étudiés. Les travaux de synthèse restent rares sur ce sujet pourtant étonnamment délicat et dans lequel se trouvent impliquées et enchevêtrées à des degrés divers des notions aussi

complexes que celles de symbiose, de tromperie, de délégation, d'asservissement, de coopération, etc. le rapport aux autres étant d'ailleurs, indifféremment un rapport aux autres vivants, ou aux objets — la distinction étant visiblement inadéquate pour comprendre ce qui est en jeu.

Epistémologiquement et méthodologiquement, la question des *anecdotes significantes* est posée d'entrée de jeu. Une approche poppérienne de la recherche scientifique leur attribue un statut secondaire quoique crucial, puisqu'elles fournissent la possibilité de réfuter une théorie — mais leur rôle se cantonne à cette tâche de voirie. Des anecdotes convergentes peuvent au contraire être considérées comme l'indication d'une piste fructueuse à suivre. Cette démarche a ainsi permis à certains éthologues de découvrir chez les primates l'existence d'actes thérapeutiques et de comportements de ruse (Un exemple très intéressant de cette démarche se trouve exposée chez Whiten et Byrne, 1988). Par la prise en compte des phénomènes interactifs et par l'importance qu'elle accorde aux comportements individuels, l'IAD permet de replacer ces anecdotes dans une réflexion théorique sur la simulation, ce que ne permettaient pas les méthodes de simulation antérieures. Il est ainsi possible de rendre compte de l'importance d'un comportement individuel apparu au cours d'une de ces anecdotes dans le comportement collectif de la société. Dans quelle mesure l'infléchet-il ? N'est-il qu'anecdotique (dans le sens où il ne modifie en rien l'organisation) ou au contraire porteur de sens (c'est-à-dire qu'il induit de nouvelles formes d'organisation ou permet d'expliquer de manière nouvelle l'organisation existante) ?

### ***6. Agents réactifs et agents cognitifs***

Il est difficile d'échapper à la question de la cognition quand on approche le vivant en termes d'agents réactifs. Le rapport que ces derniers entretiennent avec les agents cognitifs constitue en effet un thème central des sciences cognitives et de la biologie lorsqu'elles sont abordées dans une perspective évolutionniste et adaptative. Dans quelle mesure existe-t-il une intégration successive des

comportements ? Les procédures cognitives sont-elles plus adaptées que le recours à de simples processus réactifs ? Est-il si avantageux que ça d'être doté de processus cognitifs, ou est-ce seulement *plus intéressant* ?

a/ Une vision "classique" conceptualise la relation entre agents réactifs et agents cognitifs en terme d'évolution linéaire : les agents cognitifs, plus complexes que les agents réactifs, seraient le résultat d'une évolution adaptative à partir des agents réactifs. Une telle idée n'est défendable qu'à partir du moment où il est démontré qu'un agent cognitif est mieux adapté — ce qui est loin d'être le cas, aussi bien dans la nature que dans les systèmes multi-agents existants.

b/ Il existe au contraire des catégories d'agents réactifs qui connaissent un plus grand succès évolutif que des agents cognitifs. De nombreux mammifères, qui s'apparentent clairement à des agents cognitifs, sont ainsi en voie de disparition, ce qui n'est pas le cas des fourmis, qui sont plutôt modélisables en terme d'agents réactifs.

c/ Il est sans doute illusoire d'établir une hiérarchie absolue des agents. L'IAD rappelle plutôt la nécessité de considérer le processus évolutif comme une *arborescence* et non comme une *série linéaire progressive*. Dans cette optique, il est illusoire de dire que les agents cognitifs sont plus adaptés que les agents réactifs ; tout au plus peut-on prétendre qu'il s'agit de deux voies évolutives différentes, qui comportent chacune des avantages et des inconvénients. Cette approche se retrouve d'ailleurs, à un niveau opérationnel, dans la partie de l'IAD qui concerne la résolution distribuée de problèmes. Chaque problème (comme l'anomalie de Sussmann, par exemple) génère un éventail de solutions basées sur des agents tantôt réactifs (Ferber, 1989), tantôt cognitifs (Castelfranchi et Conte, 1992), dont il est difficile de mesurer le degré d'adaptivité intrinsèque tant leurs performances sont semblables.

d/ Etre un agent cognitif est sans doute plus intéressant (pour l'agent) qu'être un agent réactif. Mais il s'agit d'un gain intellectuel et émotionnel qui n'est pas directement lié à la survie. En allant plus loin, et pour rester cohérent avec ce qui a déjà été dit plus haut, il n'est pas absurde de considérer l'avènement des agents cognitifs en termes de *biodiversité*, et non plus en termes de *succession*. L'apparition des agents cognitifs constituerait en effet un gain, à la fois pour ces agents cognitifs *et* pour les agents réactifs.

e/ Une opposition tranchée entre agents cognitifs et agents réactifs n'a d'ailleurs qu'un intérêt assez restreint. Si l'on reste dans le cadre d'un paradigme coopératif, il est aisé de se rendre compte que les exemples *d'association* entre agents réactifs et agents cognitifs abondent, comme les réseaux immunitaires. D'où les questions : quels types d'association et de coopération trouve-t-on entre agents cognitifs et agents réactifs ? Existe-t-il des différences structurelles importantes, et lesquelles, entre des réseaux d'agents réactifs associés à des agents cognitifs (réseaux cellulaires, réseaux immunitaires) et les réseaux d'agents réactifs qui ne le sont pas (insectes sociaux) ?

f/ Il n'est d'ailleurs pas interdit de se demander si les agents cognitifs ne peuvent pas être caractérisés efficacement comme des réseaux d'agents réactifs, les premiers émergeant alors de certaines associations établies par les réseaux des seconds. La rupture entre systèmes réactifs et systèmes cognitifs ne serait donc qu'*apparente*. Dans ce cas, pour quelles raisons et selon quelles procédures deux systèmes réactifs peuvent-ils s'associer ? Jusqu'à quel point peut-on simuler les performances des systèmes cognitifs par des systèmes réactifs ? Et ne peut-on pas faire l'hypothèse que les systèmes cognitifs sont des associations de systèmes réactifs qui ont atteint un niveau de complexité tel que des procédures en boucle (des procédures auto-réflexives) les ont complètement transformé sous la pression de nécessités structurelles et non plus évolutives?

### ***Conclusion***

Cet article spéculatif a essayé de suggérer quelques-unes des raisons pour lesquelles la problématique des agents réactifs introduite par l'IAD pouvait se révéler particulièrement féconde dans le champ de la biologie de l'évolution, en particulier en relation avec celle des agents cognitifs. Il n'en a naturellement pas exploité toutes les possibilités, et nous voudrions indiquer en conclusion deux pistes encore peu explorées.

a/ Certains systèmes cognitifs sont dotés de *capacités esthétiques*, c'est-à-dire de la possibilité d'un rapport très particulier avec le réel, qui est d'un autre ordre que celui de l'immédiate survie. Il existe fondamentalement deux grandes catégories de systèmes vivants : *ceux qui jouent*, et ceux qui ne jouent pas. Les insectes, par exemple, ne sont jamais décrits comme jouant. Les éthologues expliquent le jeu par ses qualités éducatives ou maturationnelles. Ces explications restent pourtant peu convaincantes. L'esthétique est-elle un prolongement du jeu, et l'une des caractéristiques propres des systèmes cognitifs par rapport aux systèmes réactifs ? L'existence d'une *distance communicative critique* est une autre caractéristique qui distingue radicalement un système cognitif d'un système réactif. En d'autres termes, le mensonge, la tromperie et la ruse seront *utilisés* par un agent cognitif ; ils seront *subis* par un agent réactif.

b/ En psychologie de la cognition, l'approche en terme d'agents réactifs est également fondamentale, pour d'autres raisons encore. L'un de nous avait signalé il y a quelques années que toute véritable théorie du raisonnement ou de l'apprentissage se heurtait à un problème complexe quoique rarement évoqué : celui du langage des sujets observés ; l'observateur, anthropologue ou psychologue, doit-il utiliser le langage de la "communauté" étudiée, et doit-il recourir à la conceptualisation des sujets, au risque de voir l'investigation scientifique être entraînée vers des impasses conceptuelles et méthodologiques ? La réponse donnée était alors dénuée d'ambiguïté : l'observateur ne doit pas utiliser le langage du groupe auquel appartient le sujet sous investigation ; il doit générer son propre méta-langage pour parler du réel étudié par le sujet



observé. Nous avons alors expliqué que ce langage de description devait pouvoir s'appliquer de la même manière quels que soient les objets en jeu, et permettre de décrire dans le même langage ce que font les gens, et la façon dont ils parlent de ce qu'ils font (Lestel, 1986). La modélisation en terme d'agents réactifs offre un tel outil. L'idée de Fredkin (Toffoli et Margolis, 1987) et de S. Wolfram (1984a, 1984b) selon laquelle tout processus peut être décrit comme une structure d'automates cellulaires constitue une première piste, moins heuristique que celle des agents réactifs. Une description des systèmes complexes qui incluerait leurs interfaces avec des systèmes réactifs conduirait à un "langage commun", applicable à tout processus, et permettrait enfin d'étudier comparativement les procédures de cognition en milieux sémantiquement riches. On peut considérer que cette problématique nous échappe encore parce que nous sommes trop habitués à penser les réseaux d'agents réactifs que nous connaissons en termes de réseaux neuronaux. Mais il est d'ores et déjà évident qu'un certain nombre de caractéristiques des agents cognitifs les plus complexes ne pourront être conceptualisés qu'en terme d'interactions avec des réseaux enchevêtrés d'agents réactifs.

Les processus de simulation ne constituent pas, bien entendu, une panacée par laquelle il serait possible de résoudre tous les problèmes rencontrés. Une simulation, fût-elle la plus réussie, ne peut offrir plus que ce qu'elle a; elle permet au mieux d'inciter à explorer des possibles. En ce sens, elle reste fondamentalement heuristique. Il est important de garder à l'esprit que certains paramètres essentiels dans tout processus évolutif ne sont qu'à peine pris en compte par la simulation. Celui des durées, par exemple, et pour des raisons évidentes! Néanmoins, dans une situation dans laquelle l'humain a toujours tendance à refuser à s'en tenir au simple, la simulation apparaît comme un garde-fou extrêmement utile, pour ne pas dire indispensable.

Nous ne prenons conscience que progressivement que toute théorie du vivant est fondamentalement une théorie de l'évolution, et que toute théorie de l'évolution est intrinsèquement une théorie de la cognition. Ceci posé, une telle perspective nous entraîne fatalement

vers des problèmes dont nous ne maîtrisons encore qu'avec peine les modalités. Les vieilles frontières de nos catégories craquent de partout — par exemple ici entre l'informatique, la biologie, la psychologie et l'esthétique — et leur réévaluation est douloureuse ; mais c'est sans doute là l'un des *coûts* inévitables de la connaissance de nous-mêmes.

Dominique LESTEL(1), Benoît GRISON(2), Alexis DROGOUL(3)

(1) Ecole Normale Supérieure, 45 rue d'Ulm 75005 Paris

(2) EHESS/GERS, Paris

(3) LAFORIA, Université Paris VI, 75252 PARIS Cedex 05

### ***Bibliographie***

- BRACK A., RAULIN F. (1991) *L'évolution chimique et les origines de la vie*. Paris : Masson.
- BUVET R. (1974) *L'origine des êtres vivants et des processus biologiques*. Paris : Masson.
- CASTELFRANCHI C., CONTE R. (1992) Mind is not enough: the precognitive bases of social interaction, *Act. Simulating Societies Symposium*, University of Surrey, Guildford, pp. 93-110.
- DAVIS R., LENAT D. (1981) *Knowledge Based Systems in Artificial Intelligence* New York : McGraw Hill.
- DORAN J., PALMER M., GILBERT N. (1992) The EOS project: modelling upper Palaeolithic social change, *Act. Simulating Societies Symposium*, University of Surrey, Guildford, pp. 31-47.
- DROGOUL A., *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 l'Université Paris VI.
- DROGOUL A., FERBER J. (1993) "From Tom-Thumb to the Dockers: some experiments with foraging agents", in : *From Animals to Animals II*. Cambridge : MIT Press, pp. 451-459.
- EDELMAN G. (1992) *Bright Air, Brilliant Fire: On the Matter of Mind*, chapter 5. New York : Basic Books.
- EIGEN M. (éd.) (1979) *The Hypercycle: A Principle of Natural Self-Organization*. Berlin : Springer.
- FERBER J. (1989) Eco-problem Solving: How to Solve a Problem by Interaction, *Proceedings of the Ninth Workshop on Distributed Artificial Intelligence*, sept. 1989, pp. 113-128.

- FERBER J., DROGOUL A. (1992) Using reactive multi-agent systems in simulation and problem-solving, in : *Distributed AI: Theory & Praxis*, ECSC-EEC-EAEC, Les Gasser (éd.), Bruxelles/Luxembourg, pp. 53-80.
- GALLUP G.G. (1970) Chimpanzees: self-recognition, *Science*, 167, pp. 86-87.
- GRISON B. (1994) Chaînes et Réseaux Trophiques, in : *Encyclopédie Axis*, 1, pp. 144-145.
- GRISON B., en préparation, "De Darwin à Kropotkine : coopération, sélection et niveaux d'organisation".
- KIMURA M. (1968) Genetic Variability Maintained in a Finite Population Due to Mutational Production of Neutral and Nearly Neutral Iso-alleles, *Genetical Research*, 11, 247.
- KIMURA M. (1983) *The Neutral Theory of Molecular Evolution*. Cambridge : Cambridge University Press.
- KUHN H. (1983) Self-Organization in Molecular Aggregates and Origin of Life, *Abh.Akad.Wiss.DDR, Abt.Math., Naturwiss, Tech.*, 1N, pp. 171-186.
- LENAT D. (1983) The Role of Heuristics in Learning by Discovery: Three Case Studies, in : R. Michalski, J.G. Carbonell, T.M. Mitchell (éds.), *Machine Learning*, Palo Alto : Tioga, pp. 243-306.
- LEROI-GOURHAN A. (1983) *Mécanique vivante*, Paris : Fayard.
- LESTEL D. (1986) *Contribution à l'étude du raisonnement expérimental dans un domaine sémantiquement riche*, Thèse de doctorat EHESS.
- LEWIS J. (1981) Simpler rules for epimorphic regeneration: the polar coordinate model without polar coordinates, *J. Theor. Biol.*, 88, pp. 371-392.
- LORENZ K. (1965/1981) Des origines de la multiplicité, in : *L'Homme dans le Fleuve du vivant*, Paris : Flammarion, pp. 65-97.
- MARGULIS L., FESTER R. (1991) *Symbiosis as a Source of Evolutionary Innovation - Speciation and Morphogenesis*, Cambridge : MIT Press.
- MAYR E. (1982) *The Growth of Biological Thought-Diversity, Evolution and Inheritance*, chapter II, Cambridge : Harvard University Press.
- NEEDHAM J. (1943) *Time, the Refreshing River*, London : Allen & Unwin.
- NÜSSLEIN-VOLHARO C., FROHNHÖFER H., LEHMANN R. (1987) Determination of anteroposterior polarity in *Drosophila*, *Science*, 238, pp. 1675-1681.
- PASTEUR G. (1974) Génétique biochimique et populations : pourquoi sommes-nous multipolymorphes ?", *Mémoires de la Société Zoologique de France*, 37, p. 473.
- SAKKA M. (1990) *Les origines de l'homme : un autre regard*, Paris : Messidor.
- TABOURDEAU D., FERBER J. (1993) Hematopoiesis Simulation with Agents, in : *Modeling and Simulation*, Proceedings of ESM'93, pp. 109-113.
- THOMAS L. (1974) Death in the Open, in : *The Lives of a Cell*, New York : Viking Press.

- TOFFOLI T., MARGOLIS N. (1987) *Cellular Automata Machines: A New Environment for Modeling*, Cambridge : MIT Press.
- TURQUIER Y. (1989) *L'organisme dans son milieu : Précis de zoologie fonctionnelle I*, Paris : Doin.
- TURQUIER Y. (1994) *L'organisme en équilibre avec son milieu : Précis de zoologie fonctionnelle II*, Paris : Doin.
- VARELA F., THOMPSON E., ROSCH E. (1991) *The Embodied Mind*, Cambridge : MIT Press.
- VON NEUMANN (1966) *Theory of Self-Reproducing Automata*, (A. Burkes, éd.), Urbana : University of Illinois Press.
- WHITEN A., BYRNE R.W. (1988) Tactical Deception in Primates, *The Behavioral and Brain Sciences*, 11, 233-273.
- WOLFRAM S. (1984a) Cellular Automata as Models of Complexity, *Nature*, 311, 419-424.
- WOLFRAM S. (1984b) Computer Software in Science & Mathematics, *Scientific American*, 251, sept.1984.
- ZUCKERMAN S. (1932) *The Social Life of Monkeys and Apes*, chapter 13, New York : Harcourt Brace.