

Charles LENAY

## **Organisation émergente dans les populations : biologie, éthologie, systèmes artificiels**

L'intérêt théorique majeur des Systèmes Multi-Agents (SMA) est d'éclairer une idée ancienne et toujours fascinante que l'on trouve aussi bien dans la philosophie politique que l'éthologie, l'économie, la sociologie ou la biologie générale : les agents composant une population agissent en fonction d'un monde qui est circulairement façonné par ces actions<sup>1</sup>. Il semble y avoir là le moyen de penser une forme d'autonomie historique des phénomènes sociaux, humains ou biologiques, relativement à la simple causalité physique, mais sans abandonner pour autant le principe d'une causalité déterministe. Le comportement de chaque agent peut fort bien être exactement déterminé par son état interne et les perturbations qu'il reçoit de son environnement. Mais, si l'on admet que les comportements des agents modifient cet environnement d'une façon qui est pertinente pour ces agents, c'est-à-dire qui modifie les perturbations qu'ils recevront ultérieurement, on peut dire que ce sont les agents qui sont, au moins en partie, à l'origine de leurs propres modifications.

Les Systèmes Multi-Agents sont des simulations informatiques de tels systèmes. Les agents peuvent être dotés de fonctionnalités plus ou moins complexes, mais les systèmes constitués d'agents les plus simples, dits "réactifs", permettent d'épurer l'idée centrale

---

<sup>1</sup> Voir, par exemple Paul Dumouchel et Jean-Pierre Dupuy, *L'Auto-Organisation : de la physique au politique*, Paris, Editions du Seuil, 1983.

d'émergence, et ouvrent sur un champ d'exploration systématique<sup>1</sup>. Les agents réactifs ne font que répondre de façon déterminée à leur environnement, en produisant des actions qui le modifient. Cependant, par leurs interactions à travers cet environnement collectivement modifié, ils peuvent donner lieu à une dynamique collective complexe possédant des états stables attracteurs pour lesquels les comportements déterminent un environnement qui a justement pour effet de produire ces comportements. Ce sont ces états collectifs que l'on appelle organisation, structure, ou fonctionnalité, émergentes. L'organisation globale émerge du système des interactions locales qu'elle contraint. On voit la grande affinité de cette approche avec le connexionnisme. Je ne discuterai pas ici de la question de l'inclusion ou de la réduction d'une de ces approches à l'autre. Notons seulement le rôle crucial joué, dans les SMA, par un environnement qui, collectivement modifié, participe à la constitution des structures émergentes.

Les perspectives nouvelles ouvertes par les SMA dans le champ des sciences cognitives sont encore loin d'avoir été toutes exploitées ni même comprises. En tout cas, elles permettent d'enrichir la critique de l'individualisme méthodologique pour lequel la cognition (ou les structures sociales) ne devraient être comprise que du point de vue d'un agent doté de capacités représentationnelles. L'alternative des SMA réactifs s'inscrit plutôt dans une approche constructiviste proche de celle que l'on trouve en Vie Artificielle (voyez l'article sur "Les Agents Réactifs et le Vivant dans une perspective d'Evolution Coopérative", de Dominique Lestel, Benoît Grison, et Alexis Drogoul). Les connaissances ne seraient pas des états représentationnels internes d'un agent isomorphes à des états de choses prédéfinis externes, mais les produits du couplage des agents entre eux à travers leur environnement.

---

<sup>1</sup> Nous ne présentons pas ici les systèmes constitués d'agents dits "cognitifs" qui sont susceptibles de manipuler des représentations symboliques, et encore moins les systèmes multi-experts dont les agents sont autant de systèmes à base de connaissance. On aura un aperçu sur l'utilisation de telles techniques pour la modélisation du social dans : *Intelligence Artificielle Distribuée : Modèle ou Métaphore des Phénomènes Sociaux*, numéro spécial de la *Revue Internationale de Systémique*, Vol. 8, n° 1, 1994.

Cependant, bien en deçà de ces ambitieuses perspectives, les SMA réactifs les plus intéressants qui ont d'ores et déjà été réalisés sont des simulations de spéculations théoriques précises de divers champs de la recherche scientifique ou technique : sociétés de cellules dans un tissu, comportements de populations de fourmis, groupes structurés de singes, ensemble d'avions à l'approche d'un aéroport, groupes de robots dans un atelier, etc. Dans chaque cas, il s'agit de vérifier si des facteurs explicatifs simples, ne définissant que des règles d'interaction locale, sont suffisants pour rendre compte de phénomènes collectifs observés ou espérés. Le travail s'effectue alors dans un dialogue très rigoureux avec un champ expérimental et théorique externe.

Par exemple, Raphaël Marcepoil, Emmanuel Beaurepaire, et Sylvie Pesty présentent ici la simulation d'un système cellulaire constitué de cellules jointives. Deux substances différentes diffusent dans le réseau cellulaire et ont pour effet de déclencher soit la reproduction, soit la différenciation de ces cellules. Or ces deux comportements cellulaires ont en retour pour effet de modifier la production et la diffusion de ces substances. Cette causalité circulaire suffit à rendre compte de l'émergence d'un équilibre stable correspondant à une organisation spatiale et fonctionnelle qui reproduit ses conditions d'existence.

Autre exemple, par un dialogue serré entre modélisateurs et entomologistes il a été possible de montrer comment, par le simple jeu de diffusion de phéromones (hormones externes), les sociétés de fourmis pouvaient se différencier en un système de castes stables<sup>1</sup>.

Toujours dans le monde des fourmis, et dans le prolongement des travaux de Deneubourg<sup>2</sup>, les Systèmes Multi-Agents montrent

---

<sup>1</sup> A. Drogoul et J. Ferber, "Multi-agent simulation as a tool for studying emergent processes in societies", in *Simulating Societies: the computer simulation of social phenomena*, N. Gilbert et J. Doran (éds), Londres, UCL Press, 1994, pp. 127-142.

<sup>2</sup> Pour un article de synthèse, voir Guy Theraulaz & Jean-Louis Deneubourg, "Swarm Intelligence in Social Insects and the Emergence of Cultural Swarm Patterns", in *Proceedings of The Ethological Roots of Culture*, R.A. Gardner, A.B. Chiarelli, B.T. Gardner and F.X. Ploojd (Eds.), NATO, Kluwer, 1994. Ou

comment, par des règles locales très simples, peuvent se constituer de longues pistes stables indiquant la localisation de sources de nourriture. Or, suivant un mouvement intéressant pour la logique de la découverte dans les SMA, ces recherches ont aussi débouché sur de nouveaux résultats tout à fait inattendus. En effet, changeant très légèrement les règles de comportement de ses fourmis-virtuelles, Alexis Drogoul eut la surprise de voir se former des chaînes de transport de la nourriture. Chaque fourmi reste à une même place et passe la nourriture à sa voisine comme dans une chaîne de dockers. La compréhension de l'émergence d'une telle structure, qui ne correspond à aucun phénomène naturel, du moins dans le monde des fourmis, montre bien comment le champ de recherche sur les SMA tend à trouver son autonomie, au-delà d'une simple activité de modélisation de problèmes posés par ailleurs.

Dans son article, "Coopération réactive et émergence", Jacques Ferber présente ici ce chemin vers une recherche théorique intrinsèque sur la causalité complexe des Systèmes Multi-Agents. Partant de problèmes propres à des sciences particulières, les SMA permettent de multiples transferts entre domaines. Le niveau d'abstraction de la simulation informatique force naturellement à une recherche systématique des isomorphismes. Par exemple, c'est en s'inspirant de la résolution d'un problème éthologique que l'on pourra proposer une solution pour l'organisation d'un atelier de robots. C'est ainsi que Jacques Ferber dégage les principes pertinents pour une conception générale de la coopération qui est un des concepts les plus centraux des Systèmes Multi-Agents.

Mais, on voit là le statut épistémologique délicat de ce champ de recherche. L'informatique n'est pas employée comme un simple moyen de calcul donnant les résultats particuliers d'un problème entièrement résolu sur le plan théorique (le programme informatique qui réalise le calcul correspond alors précisément à l'explicitation algorithmique de cette théorie). L'informatique n'est pas non plus employée en tant que modèle ou métaphore du fonctionnement cognitif, comme dans l'IA où la manipulation informatique de

symboles formels mimerait le traitement cognitif de représentations symboliques.

Ici, l'outil informatique est utilisé pour *simuler* le comportement de populations, pour mettre en évidence l'apparition de structures globales nouvelles. Tout l'enjeu de ces simulations est donc de ne pas se donner au départ ce qu'il faut montrer. Non seulement, il ne faut pas qu'existe dans un agent la représentation de la structure globale à atteindre, mais il ne faut pas non plus qu'une organisation hiérarchique ou des relations prédéfinies entre les agents ne déterminent trivialement cette structure. Au contraire, les agents doivent correspondre à des programmes distincts explicitement séparés dont les règles d'interaction ne doivent être que locales. C'est seulement à la suite de la simulation qu'une organisation stable et structurée des relations entre les agents pourra émerger.

Le domaine de recherche sur les SMA se caractérise donc, au dire même des chercheurs, par le sentiment d'une réelle *expérimentation*. C'est là une différence de culture profonde vis-à-vis des autres informaticiens : il ne s'agit pas de faire le bon programme qui réalise au mieux une fonction prédéterminées, mais de mettre en place les conditions pour qu'émergent des structures ou des fonctions globale en donnant un minimum de contraintes préalables. Ainsi, à la recherche du phénomène émergent, le réglage des paramètres reste encore largement intuitif (même s'il peut parfois être guidé par des observations glanées çà et là dans divers champs empiriques).

Pourtant ce sentiment de faire des expériences en informatique ne peut se comprendre au sens d'un rapport empirique avec un champ particulier de la nature. Il s'agit ici plutôt d'*expérience de pensée* au sens fort. Il ne s'agit pas, comme dans les discussions de physique théorique, de poser un problème imaginaire dont les conséquences aisément déductibles permettent de critiquer des hypothèses explicatives proposées. Il s'agit ici d'une expérience proprement dite, au sens où le résultat inattendu ou incertains, est donné à l'intuition sensible de l'observateur. Plus précisément, sachant ou espérant un résultat global, on cherche à l'obtenir sans se le donner au préalable... tout en déterminant informatiquement son apparition.

Mais enfin, pourrait-on s'écrier, puisque les conditions initiales sont belles et bien susceptibles de déterminer l'apparition de la

structure émergente, c'est que sous une forme ou une autre celle-ci était déjà présente! On rencontre là un problème commun avec ceux que l'on trouve en *Vie Artificielle*, sur l'autonomie et l'auto-organisation. Quel est le statut épistémologique ou ontologique de cette notion d'émergence ? Cette question mériterait un travail de synthèse sur l'immense littérature qu'elle a déjà suscité. Je me contenterai ici de quelques remarques pour faire sentir l'apport possible des Systèmes Multi-Agents.

Dans un premier temps, on pourrait dire que l'émergence n'existe que d'un point de vue épistémologique, qu'elle est liée à notre ignorance des outils théoriques permettant de déduire la structure émergente globale à partir de la connaissance des lois de comportement locales. Dans cette ignorance, on ne peut que simuler le comportement du système : on demande à l'ordinateur de déduire à notre place le comportement global à partir de conditions initiales précises, c'est-à-dire à partir d'une disposition spatio-temporelle précise des états des agents dans leur environnement.

Mais cette ignorance ne reflète-t-elle qu'un point de vue momentané du théoricien. Si une théorie du passage entre le niveau local et le niveau global venait à être découverte, faudrait-il admettre qu'il n'y ait plus d'émergence à proprement parler<sup>1</sup>. La recherche théorique sur l'émergence serait donc paradoxalement dédiée à faire disparaître son objet. L'issue pour maintenir l'idée d'émergence ne serait alors que d'espérer une preuve d'impossibilité de principe à découvrir ces lois de passage entre niveaux.

Une autre voie consiste à donner une définition plus précise et plus forte de l'émergence qui ne se réduise pas à une position de l'observateur vis-à-vis du système. On ne se contentera pas d'exiger l'absence de représentation de la structure globale dans les agents qui la produisent, ni même l'absence des propriétés de l'état émergent dans les propriétés des agents. En effet, ces exigences ne peuvent être caractérisées que du point de vue d'une description théorique particulière qui pourrait toujours être dépassée. De même, s'attacher à la stabilité de l'organisation émergente relativement aux variations ou changements des composants, exige que l'on puisse

---

<sup>1</sup> E. Nagel, *The structure of science. Problems in the logic of scientific explanation*, 5 éd., Londres, Routledge & Kegan Paul, 1979.

identifier comme telle cette organisation. Quel critère objectif permettrait d'affirmer qu'il s'agit de la même organisation en dépit des multiples variations locales ? Une façon de dépasser une référence trop directe aux capacités de discrimination de l'observateur me semble être de demander à l'organisation émergente de se distinguer elle-même d'autres organisations émergentes possibles pour le même système. Dans cette perspective radicale sur l'émergence, la structure globale doit entièrement déterminer les contraintes locales qui la différencient des autres structures possibles dans le même système. Remarquons qu'une telle demande nécessite d'admettre une pluralité possible des émergences pour une même population. Mais cela semble bien indispensable si l'on espère trouver dans les Systèmes Multi-Agents une quelconque intelligibilité de l'histoire sociale.

Un exemple de telles conditions sur l'émergence peut être extrait des passionnantes observations de Dominique Fresneau et Christine Errard sur "L'identité coloniale et sa "représentation" chez les fourmis". Pour dégager ce schéma explicatif, je simplifie et m'éloigne d'autant du champ d'origine. L'article qui suit montrera la richesse infiniment plus grande de la diversité empirique.

Le "visa colonial" est une signature chimique commune qui est portée sur la cuticule de chaque individu d'une même colonie. Il permet à chaque fourmi de discriminer les fourmis d'autres espèces ou d'autres colonies de la même espèce. Lors d'une rencontre entre deux fourmis, chacune compare (par un mécanisme que l'on peut supposer très simple) le visa de l'autre fourmi à celui qu'elle porte sur sa propre cuticule. S'ils sont différents, il y a un conflit qui débouche en général sur la fuite d'un des deux protagonistes. S'ils sont suffisamment proches, les fourmis peuvent procéder à divers échanges qui tendent à harmoniser encore mieux les signatures chimiques de leurs cuticules. En effet, le visa colonial est le produit du mélange de molécules sécrétées par les fourmis (différents hydrocarbures). Chaque fourmi différente (elles peuvent l'être génétiquement si différents mâles ont contribué à la formation de la spermatèque de la reine) sécrète différentes proportions de molécules caractéristiques sur sa cuticule et sur le sol, dans et à l'entrée de la fourmilière. Ce sont les échanges permanents des

fourmis entre elles et avec le sol qui constituent le visa colonial. Ainsi, chaque fourmi ne contribue individuellement que très peu à la composition chimique du visa colonial qu'elle porte sur sa propre cuticule. Dans ce processus de moyennisation permanente, le visa d'une colonie reste globalement stable, alors même que les fourmis meurent et sont remplacées par des nouvelles. Les jeunes fourmis, dès leur émergence au coeur de la fourmilière (dans le contexte de l'entomologie, le terme "d'émergence" désigne le passage de la nymphe à l'adulte), adoptent le visa colonial qu'elles peuvent cependant transformer très légèrement en y ajoutant leur petite touche individuelle. Ce qui assure la stabilité globale du visa, c'est essentiellement le rôle de mémoire externe qu'il joue lors du comportement de rejet des fourmis étrangères. Cependant, rien dans chaque agent-fourmi, ne prédétermine sa nature. En effet, on peut réaliser des transferts artificiels de quelques fourmis d'une colonie à une autre : on nettoie leurs cuticules puis on les badigeonne du visa colonial d'une autre colonie (extrait d'un échantillon du sol prélevé à l'entrée de la fourmilière d'accueil). Ces fourmis maquillées sont introduites dans la nouvelle colonie. Les premières rencontres peuvent être plus ou moins difficiles (la composition des hydrocarbures sur le sol, ou la méthode d'extraction, ne permettent pas d'obtenir une signature chimique qui reflète exactement le visa de la colonie d'accueil). Si ces fourmis réussissent à franchir l'étape des premiers contacts, elles adoptent le visa colonial exact de la nouvelle colonie (qu'elles peuvent cependant modifier très légèrement en apportant leur touche particulière). Elles s'intègrent définitivement et pourront participer loyalement aux combats contre les colonies étrangères, y compris leur colonie d'origine.

La propriété émergente, disons le "visa colonial", n'est déterminée par aucun agent particulier (même pas la reine), mais par l'ensemble de la population, et les limites de cette population sont déterminées par la propriété émergente. Il y a émergence, au sens fort, d'une mémoire collective externe, parce que c'est elle qui détermine les interactions locales entre agents. Et que ce sont ces interactions (rejet ou adoption) qui en retour assurent la stabilité de ce visa et le distingue des autres visas possibles dans le même système.

On voit le rôle conceptuel crucial joué par "l'environnement" dans cette conception de l'émergence. D'un point de vue externe,

on pourrait dire que l'environnement impose aux agents des comportements constants. Il semble donc trivial de montrer que des environnements différents produiront des comportements différents. Cependant, toute la dynamique des Systèmes Multi-Agents met en évidence la façon dont cet environnement est produit par ces comportements, la façon dont il est construit par les agents qui en subissent les effets. Dès lors, du point de vue interne des agents, l'environnement n'est que ce qui est susceptible de provoquer des perturbations pertinentes de leur dynamique individuelle. La question sur le statut ontologique et épistémologique de l'émergence se déplace en une question sur le statut ontologique et épistémologique de "l'environnement partagé". C'est un des objectifs théoriques fondamentaux de la recherche dans les Systèmes Multi-Agents que d'éclaircir cette question.

On a vu que, dans ce cadre, l'outil informatique était un moyen d'exploration quasi-expérimental d'un champ théorique non encore systématisé. Cependant, si l'on garde l'espoir d'en tirer progressivement une intelligibilité générale des phénomènes d'émergence, il faudra certainement au moins systématiser ces expériences de pensée. Un des axes de recherche dans ce domaine est donc de le doter d'une méthode qu'il tirerait de ses propres principes.

Charles LENAY  
Université de Technologie de Compiègne  
Unité COSTECH