

Conceptualisation de l'émergence : dynamiques microscopiques et analyse macroscopique des SMA

Robin Lamarche-Perrin

Laboratoire d'Informatique de Grenoble, Université de Grenoble
38400 Saint-Martin-d'Hères, France
Robin.Lamarche-Perrin@imag.fr

Résumé : La décentralisation et l'asynchronisme croissant des SMA posent un problème de fond à l'IA : *comment réaliser une analyse macroscopique de systèmes conçus au niveau microscopique ?* Cet article propose de répondre à ce problème en élaborant un concept d'émergence adéquat.

Les origines philosophiques de la notion d'émergence permettent de formuler les exigences d'une telle conceptualisation. L'idée principale tient sur le fait que les phénomènes émergents ne doivent pas être considérés comme une propriété des SMA, mais comme une propriété de la méthode d'observation utilisée. Nous parlons d'*émergence épistémique*. Deux exigences concernant l'approche des SMA sont formulées à partir de ce concept. Nous présentons une méthode d'*observation macroscopique* compatible avec ces exigences et répondant ainsi à la problématique de cet article.

Mots-clés : SMA, émergence et analyse macroscopique

1. Introduction

La taille et la complexité croissante des systèmes informatiques pose un problème de fond à l'IA : *comment construire une image macroscopique de leur exécution pour appréhender globalement leur dynamique ?* Dans le cas de systèmes multi-agents (SMA) décentralisés et asynchrones, la réalisation d'une telle image est complexifiée par la nature fondamentalement microscopique des dynamiques internes. Elle interdit d'utiliser les outils d'abstraction classiques développés par le Génie Logiciel et l'ensemble des approches *top-down* de l'informatique. Le paradoxe qu'il faut alors s'efforcer de résoudre pour l'avenir des SMA est le suivant : *comment, dans le cadre d'une approche*

bottom-up des systèmes, peut-on accéder à un niveau d'analyse macroscopique à partir de leur conception au niveau microscopique ?

[Deguet *et al.*, 2006] donne une définition minimale du concept d'émergence que nous prenons comme origine pour notre discussion : *un phénomène apparaît au sein des dynamiques du système ; celui-ci requiert, pour être compris, de distinguer au moins deux niveaux de description*. Le paradoxe peut alors être ainsi reformulé : *comment avoir une conception cohérente des phénomènes émergents alors qu'ils ont à la fois une base microscopique et une présence macroscopique ?*

Pour répondre à cette question, la section 2 revient aux origines philosophiques de la notion d'émergence. La distinction entre deux positions ontologiques concernant la structure de la réalité (le *dualisme* et le *monisme*) nous amène à développer deux formes d'émergence (*ontologique* et *épistémique*). Nous montrons que l'*émergence épistémique* offre une première réponse au paradoxe formulé. Ce concept est ensuite adapté dans la section 3 au domaine des SMA. Il induit des exigences concernant les méthodes d'analyse des systèmes. Nous présentons nos travaux antérieurs, portant sur une approche des SMA par *observation macroscopique*, et nous montrons qu'ils répondent aux exigences établies.

2. Philosophie et conceptualisation de l'émergence

Cette première section a pour objectif de présenter les origines historiques de la notion d'émergence et les enjeux liés à son apparition (sections 2.1 et 2.2). C'est l'occasion de préciser en termes philosophiques le paradoxe soulevé en introduction et d'y apporter une première réponse, reposant sur la notion d'*émergence épistémique* (section 2.3). Les conséquences en termes d'exigences scientifiques pour la conceptualisation de l'émergence sont développées dans la section 2.4.

2.1. Engagement ontologique

En philosophie s'affrontent deux conceptions antagonistes du monde : le *dualisme* et le *monisme*. Bon nombre de débats peuvent être synthétisés sur la base de cette opposition. Par exemple, l'affrontement à la fin du XIX^e siècle de deux thèses philosophiques concernant l'explication des phénomènes du vivant : le *vitalisme* et le *mécanisme*, peut être résumé en ces termes ¹.

1. Cf. [O'Connor and Wong, 2006] pour plus de détails sur cet affrontement historique.

Dualisme Position affirmant que le monde est constitué d'*au moins deux* substances telles que l'existence de l'une ne saurait être entièrement déterminée par celle de l'autre. Le *vitalisme* invoque ainsi un principe de force vitale qui anime les organismes vivants et qui ne peut être réduit aux lois de la physique et de la chimie.

Monisme Position affirmant que le monde est constitué d'*une seule* substance dont la nature détermine l'ensemble des phénomènes existants. Le *mécanisme* affirme ainsi que les lois du vivant sont l'effet des lois physico-chimiques seulement (nous parlons de *monisme matérialiste*²). Il n'existe alors aucune substance vitale indépendante de la matière.

Le choix du dualisme ou du monisme présente un engagement ontologique, c'est-à-dire un engagement sur *ce qui existe effectivement*. La question sous-jacente est celle de la *réductibilité* de certains niveaux de la réalité (*e.g.*, l'ensemble des phénomènes biologiques) à un niveau fondamental (*e.g.*, les phénomènes physico-chimiques). A ce stade, le dualisme affirme qu'une telle réduction est impossible. Le monisme affirme le contraire.

Nous n'énumérons pas ici les arguments qui ont été présentés depuis le début de la philosophie en faveur ou en défaveur de l'une ou l'autre de ces deux positions. La section 2.4 présente néanmoins la position couramment acceptée en science aujourd'hui et les principales raisons de ce choix.

2.2. Une voie moyenne

Pour quoi rejeter le dualisme ? Parce qu'il est ontologiquement coûteux. Il postule de l'existence de plusieurs substances fondamentales (*e.g.*, matière et force vitale) et compromet ainsi l'unité du réel. *Pourquoi rejeter le monisme ?* Parce qu'il n'explique pas comment certains phénomènes apparaissent malgré tout. Il contourne le problème en éliminant ces phénomènes par réduction³.

Si on rejette le dualisme et le monisme, que reste-il ? La notion d'émergence est justement développée par la philosophie britannique entre la fin du XIX^e siècle et le début du XX^e dans le cadre du débat opposant les thèses vitalistes et mécanistes. Selon [O'Connor and Wong, 2006], les *émergentistes* désirent démêler le paradoxe soulevé par le rejet simultané du dualisme et

2. Il en existe d'autres formes : monisme *idéaliste* (le niveau fondamental de la réalité est constitué d'idées et de perceptions), monisme *neutre* (niveau fondamental indéterminé), *etc.* Ces positions ontologiques ne sont pas utiles pour les discussions menées dans cet article.

3. La section 2.4 explicite les notions d'*unité du réel* et d'*élimination des phénomènes*, ainsi que les exigences qu'elles induisent en science.

du monisme. Ils cherchent alors une *voie moyenne*, s'opposant à l'existence d'une substance vitale, mais retenant des propriétés irréductibles du vivant.

L'apparent paradoxe de cette troisième voie est source de nombreux malentendus, en philosophie comme en science. Comment des phénomènes biologiques pourraient-ils être irréductibles s'il n'existe aucune substance propre au vivant pour les soutenir ? En d'autres termes comment est-il possible de soutenir une forme de *monisme non-réductionniste* ?

2.3. Deux formes d'émergence

En philosophie, il est primordial de distinguer ce qui est d'ordre *ontologique* de ce qui est d'ordre *épistémologique*. Ces deux termes permettent de mieux comprendre le projet émergentiste⁴.

Ontologie (De *ontos* : « ce qui est ») Est ontologique tout ce qui se réfère à la réalité effective des choses. L'émergence *ontologique* postule ainsi l'existence de plusieurs niveaux de réalités. Un niveau « émerge » sur la base d'un niveau plus fondamental, c'est-à-dire qu'il est établi à partir de celui-ci mais qu'il acquiert « une certaine forme d'autonomie ».

Épistémologie (De *epistêmê* : « la connaissance ») Est épistémologique tout ce qui se réfère à la connaissance que l'on a des choses, et non de ce qu'elles sont en soi. L'émergence *épistémologique* rend ainsi compte de niveaux de connaissance relatifs à des manières d'observer, de décrire ou de représenter la réalité. L'émergence n'est plus une caractéristique propre des phénomènes, mais une propriété de l'observateur.

Pour comprendre la possibilité d'un *monisme non-réductionniste*, et démêler ainsi le paradoxe de l'émergence, nous proposons de nous attarder sur la notion d'*émergence épistémologique*. (1) Il s'agit d'un *monisme* dans la mesure où l'on postule de l'existence d'une seule substance, d'un seul niveau de réalité. (2) Elle est cependant *non-réductionniste*, puisque les niveaux de connaissance émergent *en pratique*. Bien qu'on puisse les réduire *en principe*, ils constituent un intérêt pour l'étude des phénomènes⁵. L'émergence épistémologique permet donc de trouver la troisième voie entre *dualisme* et *monisme*.

4. La distinction que nous faisons ici entre *émergence ontologique* et *émergence épistémologique* est similaire aux distinctions proposées par plusieurs auteurs entre *émergence forte* et *émergence faible* (cf. par exemple [Bedau, 1997] et [Stephan, 1999]).

5. Pour être plus précis, il faudrait parler de *monisme non-éliminatif* (cf. section 2.4). Pour un véritable exemple de *monisme non-réductionniste*, voir le concept de *survenance* dans [Kistler, 2007] ou dans [O'Connor and Wong, 2006].

2.4. Les engagements de la science

L'engagement ontologique largement répandu dans la communauté scientifique contemporaine est un *monisme matérialiste* (ou *physicalisme*). Cette position est importante pour la conception scientifique du monde parce qu'elle permet d'assurer la possibilité d'une *unité du réel* et de l'*unification des sciences spéciales* (chimie, biologie, psychologie, sociologie, *etc.*). Selon [Bedau, 1997], l'émergence ontologique est une « théorie magique », c'est-à-dire une théorie invoquant des principes *ad hoc*, artificiels (et bien souvent obscurs) pour expliquer les phénomènes complexes. De manière générale, le dualisme est également perçu de cette manière par la communauté scientifique (exception faite de certains domaines), à cause de sa propension à postuler l'existence d'autant de substances qu'il y a de types de phénomènes.

La science doit cependant se prémunir de toute forme d'*éliminativisme*. Cette attitude consiste à user du principe de réduction pour évacuer toutes explications non-physiques des phénomènes naturels dans la mesure où celles-ci ne correspondent pas à l'engagement ontologique. Elle met à mal les sciences spéciales qui perdent leur pertinence pour décrire réel⁶.

La thèse de l'*émergence épistémique* répond à ces deux exigences. Premièrement, elle est cohérente avec le matérialisme dans la mesure où les phénomènes émergents n'ont pas de réalité propre, sinon dans l'œil de l'observateur. Deuxièmement, puisqu'elle ne nie pas entièrement l'existence de ces phénomènes, l'émergence épistémique donne une place essentielle aux sciences spéciales. Elles sont des outils d'abstraction permettant de comprendre les phénomènes perçus selon plusieurs niveaux de connaissance.

3. Émergence et systèmes multi-agents

Cette section revient sur le paradoxe exprimé en introduction concernant l'analyse des SMA : *comment peut-on accéder à un niveau d'analyse macroscopique à partir d'une conception au niveau microscopique ?* La notion d'*émergence épistémique* développée dans la section précédente nous permet de définir les contours d'une conceptualisation adéquate de l'émergence pour répondre au problème.

La section 3.1 explique comment les termes de la précédente discussion sont appliqués au domaine des SMA. La section 3.2 expose nos travaux

6. Pour une plus longue discussion de l'*éliminativisme* en science, se référer par exemple à [Chalmers, 2006] et à [Kistler, 2007].

antérieurs concernant la notion d'*observation macroscopique*. Nous montrons qu'elle répond aux exigences que nous avons formulées (section 2.4) et qu'elle permet ainsi de fonder la notion d'émergence. Les sections 3.3 et 3.4 présentent d'autres conséquences importantes pour les SMA. Il s'agit des notions de *causalité descendante* et de *modèle de l'observateur*.

3.1. Les exigences de l'émergence épistémique

Les deux caractéristiques principales de l'émergence épistémique (le *monisme* et le *non-éliminativisme*) sont ici appliquées au cadre des SMA. Elles indiquent les exigences auxquelles doivent satisfaire les méthodes d'analyse pour répondre au paradoxe microscopique / macroscopique.

Monisme microscopique Dans le pire des cas, les SMA sont *entièrement exécutés au niveau microscopique*, c'est-à-dire au niveau des agents. Pour être compatible avec la décentralisation et l'asynchronisme des systèmes, les méthodes d'analyse doivent donc être exécutées à partir du niveau microscopique également.

Non-éliminativisme La compréhension des SMA demande souvent *une description macroscopique* de l'exécution. Dans le cas de SMA de très grande taille, le nombre et la complexité des données interdit de limiter l'analyse au niveau microscopique. Un travail d'abstraction est alors nécessaire pour engendrer une sémantique et des images macroscopiques.

Dans cette optique, sont à rejeter les méthodes d'analyse qui présupposent des outils de centralisation ou de synchronisation dans les SMA pour appuyer la collecte des données. Sont à rejeter également les méthodes qui limitent leur explication causale à une description des dynamiques microscopiques.

Parmi la littérature multi-agents, de nombreuses approches répondent à l'une et/ou l'autre de ces exigences. Les systèmes auto-organiseurs sont de très bons exemples de SMA microscopiques dans la mesure où l'émergence y est programmée uniquement à partir de fonctions locales interagissantes [Picard, 2004]. De la même manière, la définition de l'émergence par [Bonabeau and Dessalles, 1997] soutient une approche non-éliminative dans la mesure où les phénomènes émergents sont construits relativement à des appareils de détection hiérarchisés. Dans la section suivante, nous présentons l'approche que nous avons nous-mêmes développée selon ces principes.

3.2. Observation macroscopique

Dans [Lamarche-Perrin *et al.*, 2011], nous expliquons que l'analyse des SMA est souvent effectuée en deux étapes : (1) observation des dynamiques microscopiques et (2) analyse *a posteriori* des données collectées (*e.g.*, analyse de traces d'exécution [Joumaa *et al.*, 2009], simulation des dynamiques microscopiques des systèmes [Louie and Carley, 2008]). La taille des données microscopiques collectées explose pour des SMA de très grande taille ou exécutés sur de très longues durées. Nous proposons de développer des outils d'observation engendrant *directement* des données macroscopiques informant sur les phénomènes émergents du système. Ces outils reposent sur la conception de sondes macroscopiques et d'algorithmes d'observation distribués agrégeant la structure causale de l'exécution ⁷.

La notion d'observation macroscopique est cohérente avec la notion d'émergence épistémique pour les deux raisons suivantes. (1) Elle soutient un *moniste microscopique* dans la mesure où les sondes agissent au niveau des agents et les algorithmes implémentés sont entièrement distribués (*i.e.* soutenus par l'activité locale des agents). (2) Elle est *non-éliminativiste* dans la mesure où les images obtenues, présentant l'agrégation de données microscopiques, introduisent une sémantique globale pour l'analyse de l'exécution. Ces images permettent en effet d'abstraire les dynamiques internes, de définir des entités macroscopiques virtuelles ainsi que leurs relations causales.

3.3. Causalité et SMA

La notion de *causalité descendante* (ou *downward causation*) se réfère à l'ensemble des relations de causalités qui pourraient exister entre un phénomène d'un niveau donné (la cause) et un phénomène d'un niveau inférieur (l'effet). La question de l'existence de causalités descendantes est très fortement liée au choix ontologique du dualisme ou du monisme. Elle est habilement discutée par [Deguet *et al.*, 2006] en ce qui concerne les SMA.

Dans notre cas, le monisme microscopique assure qu'une telle causalité n'est pas nécessaire à la définition de l'émergence. Ainsi, les phénomènes émergents que nous analysons doivent être envisagés selon une approche *épi-phénoménaliste* (*cf.* par exemple [Forrest, 1990]). Il s'agit d'une position moniste selon laquelle les niveaux émergents sont constitués d'épiphénomènes, c'est-à-dire d'effets qui s'ajoutent à ceux des dynamiques microscopiques et

7. *Cf.* [Lamarche-Perrin *et al.*, 2011] pour une description détaillée de ces méthodes.

qui n'ont aucun pouvoir causal en retour. Les abstractions engendrées par l'observation macroscopique ne peuvent être considérées comme des entités influençant la dynamique interne des SMA.

Cependant, d'autres travaux sur l'émergence s'appuient sur la notion de causalité descendante. Par exemple, les « systèmes à tableau noir » (ou *black-board systems*) présentent des espaces de mémoire partagée que l'on peut assimiler à des entités macroscopiques [Sawyer, 2001]. L'activité de l'ensemble des agents modifie le tableau (causalité ascendante) et le tableau influence en retour le comportement des agents (causalité descendante). Quoiqu'il en soit, l'utilisation d'une mémoire centralisant des données entraîne l'incompatibilité de ces systèmes avec le *monisme microscopique* et ne peut donc être appliquée à des SMA entièrement décentralisés⁸.

Les SMA multi-modèles sont un autre exemple de SMA à causalité descendante [Gil-Quijano *et al.*, 2010]. Différents niveaux de modélisation s'influencent causalement et sont maintenus cohérents les uns par rapport aux autres. Le *dualisme* manifeste de cette approche empêche de l'appliquer également à des systèmes dont la dynamique est entièrement microscopique.

3.4. Émergence relative à l'observateur

La seconde question soulevée par [Deguet *et al.*, 2006] concerne le rôle de l'observateur dans la définition de l'émergence. Le caractère épistémique de notre conceptualisation nous invite à définir l'émergence relativement à une méthode d'observation. On introduit alors un *modèle de l'observateur*⁹.

De nombreux travaux donnent une vision relativiste de l'émergence (*e.g.*, à travers la notion de « surprise » dans [Ronald and Sipper, 2001], en fonction d'appareils de détection [Bonabeau and Dessalles, 1997] ou par des grammaires de modèles [Kubík, 2003]). C'est également le cas de l'*observation macroscopique*. Les phénomènes émergents y sont en effet définis relativement à un dispositif d'agrégation particulier. Pour une même dynamique microscopique, il est possible d'obtenir de nombreuses images macroscopiques différentes, chacune apportant un sens nouveau aux descriptions globales de

8. L'environnement du SMA peut être vu comme un espace de mémoire partagée lorsque les agents disposent d'un accès global et immédiat. Cependant, un environnement distribué, auquel les agents ont seulement un accès localisé, est conforme au monisme microscopique.

9. Il est également possible d'introduire un *modélisateur* produisant des modèles de l'exécution selon plusieurs niveaux (*cf.* par exemple [Gil-Quijano *et al.*, 2010]). [Bonabeau and Dessalles, 1997] expliquent pourquoi les notions d'« émergence relative à l'observation » et d'« émergence relative à la modélisation » sont en fait profondément similaires.

la dynamique. Pour un SMA donné, le choix des points de vue à adopter repose sur une évaluation pragmatique des descriptions engendrées. Il s'agit nécessairement d'un choix *ad hoc* qui dépend : du SMA étudié, des phénomènes que l'on veut voir émerger, et plus largement : des objectifs de l'analyse et du contexte scientifique auquel elle participe [Van de Vijver, 1997].

Notre conception *relativiste* de l'émergence s'oppose à certains travaux dont le but est d'en formuler une définition objective, c'est-à-dire indépendante de la méthode d'analyse effectivement employée (*cf.* par exemple [Darley, 1994] et [Bedau, 1997]). Nous pensons que ces conceptualisations manquent une qualité essentielle des phénomènes émergents, c'est-à-dire le fait qu'ils peuvent être délimités et décrits pertinemment de plusieurs façons différentes. Les concepts développés dans ces travaux présentent une forme d'*éliminativisme* contraire aux exigences que nous nous sommes posées.

4. Bilan et perspectives

Dans cet article, l'émergence n'est pas une propriété des SMA, mais le fait de celui qui les analyse. Nous parlons d'*émergence épistémique*. Ce point de départ, issu des discussions philosophiques à l'origine du concept, nous permet de formuler deux exigences en ce qui concerne l'analyse des SMA. (1) Le *monisme microscopique* implique que l'analyse soit entièrement soutenue par les dynamiques microscopiques. Ainsi, l'analyse de l'émergence à partir d'espaces de mémoire partagée [Sawyer, 2001] ou de structures multi-modèles [Gil-Quijano *et al.*, 2010] ne sont pas conformes à cette exigence et doivent donc être rejetée dans le cas de SMA décentralisés. (2) Le *non-éliminativisme* invite à ne pas limiter l'analyse au niveau microscopique et à multiplier les points de vue sur le système. Les définitions « objectives » de l'émergence [Darley, 1994] [Bedau, 1997] sont donc à rejeter également.

Nous pensons qu'une approche non-conforme à ces deux exigences ne saurait prétendre à la compréhension de SMA complexes, décentralisés et asynchrones. La méthode d'*observation macroscopique* [Lamarche-Perrin *et al.*, 2011] présentée dans la section 3.2 répond à ces exigences. Dans l'avenir, nous souhaitons formaliser le concept d'*émergence épistémique* à partir de cette approche et ainsi démêler le problème de l'analyse macroscopique des dynamiques microscopiques. Pour aller plus loin, la multiplicité des descriptions permet d'introduire de nombreux niveaux d'analyse intermédiaires (méso-scopiques). Il est donc possible de fonder une approche multi-niveaux à partir d'algèbres de sondes et de compositions d'observations macroscopiques.

Références

- M. Bedau. Weak Emergence. *Philosophical Perspectives*, 11 :375–399, 1997.
- É. Bonabeau and J.-L. Dessalles. Detection and Emergence. *Intellectica*, 25 :85–94, 1997.
- D. J. Chalmers. Strong and Weak Emergence. *The Re-emergence of Emergence*, 2006.
- V. Darley. Emergent Phenomena and Complexity. *Artificial Life*, 4 :411–416, 1994.
- J. Deguet, Y. Demazeau, and L. Magnin. Element about the Emergence Issue : A Survey of Emergence Definitions. *ComPlexUs*, 3 :24–31, 2006.
- S. Forrest. Emergent computation. *Physica D*, 42 :1–11, 1990.
- J. Gil-Quijano, G. Hutzler, and T. Louail. Accroche-toi au niveau, j'enlève l'échelle. Éléments d'analyse des aspects multiniveaux dans la simulation à base d'agents. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 24 :625–648, 2010.
- H. Joumaa, Y. Demazeau, and J.-M. Vincent. Performance Visualization of a Transport Multi-agent Application. pages 188–196, 2009.
- M. Kistler. La Réduction, l'émergence, l'unité de la science et les niveaux de réalité. *Matière Première*, 2 :67–97, 2007.
- A. Kubík. Toward a Formalization of Emergence. *Artificial Life*, 9 :41–65, 2003.
- R. Lamarche-Perrin, Y. Demazeau, and J.-M. Vincent. Macroscopic Observation of Multiagent Systems. Technical Report RR-LIG-010, Laboratoire d'Informatique de Grenoble, 2011.
- M. A. Louie and K. M. Carley. Balancing the Criticisms : Validating Multi-Agent Models of Social Systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(2) :242–256, 2008.
- T. O'Connor and H. Y. Wong. Emergent Properties. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2006.
- G. Picard. *Méthodologie de développement de systèmes multi-agents adaptatifs et conception de logiciels à fonctionnalité émergente*. PhD thesis, Université Paul Sabatier de Toulouse III, 2004.
- E. M. A. Ronald and M. Sipper. Surprise versus unsurprise. *Robotics and Autonomous Systems*, 37 :19–24, 2001.
- R. K. Sawyer. Simulating Emergence and Downward Causation in Small Groups. *Multi-Agent-Based Simulation*, 1979 :49–67, 2001.
- A. Stephan. Varieties of Emergentism. *Evolution&Cognition*, 5 :49–59, 1999.
- G. Van de Vijver. Émergence et explication. *Intellectica*, 2(25) :7–23, 1997.