

Observation macroscopique et émergence dans les SMA de très grande taille

Robin Lamarche-Perrin^a Yves Demazeau^b Jean-Marc Vincent^c
Robin.Lamarche-Perrin@imag.fr Yves.Demazeau@imag.fr Jean-Marc.Vincent@imag.fr

Laboratoire d'Informatique de Grenoble, France,
^aUniversité de Grenoble, ^bCNRS, ^cUniversité Joseph Fourier

Résumé

L'analyse des SMA de très grande taille nécessite de passer de la conception microscopique des agents à une description macroscopique de l'exécution. Cet article propose de résoudre trois difficultés liées à ce changement de niveau. (1) Il définit le concept d'émergence comme une propriété relative à l'observation et le formalise à partir des notions de description et de complexité. (2) Il présente des outils pour modéliser la causalité au sein des exécutions. Des opérations d'agrégation permettent dans un second temps d'engendrer des descriptions causales macroscopiques. (3) Il propose une méthode d'observation macroscopique (i.e., engendrant directement des descriptions agrégées) pour appliquer ces outils aux SMA de très grande taille. Cette approche est enfin évaluée sur un exemple classique de colonie de fourmis.

Mots-clés : *Méthodologies multi-agents, analyse de l'émergence, observation macroscopique.*

Abstract

The analysis of large-scale MAS requires a jump from its microscopic design to a macroscopic description of its execution. This paper addresses three difficulties in relation with this change of level. (1) It defines the emergence concept as a relative-to-observation property and formalizes the concept starting from the notions of description and complexity. (2) It sketches a method for causal description of MAS execution and an aggregation method to generate macroscopic causal descriptions. (3) It finally presents a macroscopic observation approach to apply these methods to large-scale MAS and realizes a change of level by directly generating aggregated descriptions of their execution. The approach is evaluated on the well-known example of ant colony.

Keywords: *Multiagent methodologies, emergence analysis, macroscopic observation.*

1 Introduction

La taille et la complexité croissantes des systèmes multi-agents (SMA) posent un problème de fond à l'Intelligence Artificielle. Pour élaborer des outils de conception et d'optimisation efficaces, la compréhension des systèmes ne peut se limiter à une description microscopique de leurs dynamiques internes. Il est nécessaire de passer d'une conception simplement microscopique à une analyse macroscopique, c'est-à-dire au niveau des *phénomènes émergents*.

Trois problèmes liés au changement de niveau dans l'analyse des SMA se détachent immédiatement. Problème (1) : qu'est-ce qu'un phénomène émergent ? En premier lieu, il s'agit de définir la notion de « niveau macroscopique ». En outre, toute conceptualisation de l'émergence doit être soigneusement positionnée vis-à-vis des définitions couramment développées en IA. Nous donnons dans cet article de nombreuses références à ce propos. Le lecteur pourra également se référer aux bibliographies de Picard [20] et de Deguet [6].

Problème (2) : comment effectuer le changement de niveau ? Il s'agit de concevoir des outils formels pour caractériser, détecter ou construire les phénomènes émergents. Comme nous le verrons, ce problème est fortement lié aux notions de complexité et de réduction.

Problème (3) : comment appliquer ces outils aux SMA de très grande taille ? Dans la mesure où le nombre des données microscopiques nécessaires au changement de niveau est trop important, les approches classiques ne passent pas à l'échelle. Il est alors difficile d'appliquer les outils définis aux SMA grands et complexes.

La section 2 de cet article répond au problème (1). Elle définit et formalise la notion d'*émergence épistémique* relativement à celles de *description formelle* et de *complexité*. La section 3 répond au problème (2) en introduisant un formalisme, emprunté au domaine des systèmes

distribués, pour modéliser la causalité au sein de l'exécution des SMA. Des opérations d'agrégation et des fonctions de complexité sont définies afin d'abstraire les structures causales et d'engendrer des descriptions macroscopiques. La section 4 répond enfin au problème (3). Les opérations d'agrégation sont implémentées à partir de sondes et d'algorithmes distribués pour obtenir *directement* des descriptions macroscopiques, sans passer par la collecte et l'analyse de données microscopiques. Cette approche est évaluée sur un exemple de colonie de fourmis.

2 Émergence épistémique

Cette section répond au problème (1) formulé en introduction. Elle établit deux exigences concernant la conceptualisation de l'émergence et positionne ainsi notre approche. L'émergence y est formalisée à partir des notions de *description formelle* et de *complexité*.

2.1 Conceptualisation

Dans un SMA, on distingue : (1) le *système*, c'est-à-dire le modèle des agents et de leurs comportements, (2) les *exécutions* de ce modèle et (3) les *descriptions* de ces exécutions, c'est-à-dire les manières de les représenter (*e.g.*, par des graphiques, formules, grammaires, propositions, *etc.*). Dans cet article, l'émergence n'est pas définie comme une propriété des systèmes ou des exécutions (1 et 2), mais comme une propriété de leurs descriptions (3). Il s'agit d'une notion *subjective*. On parle d'*émergence épistémique* [24, 19] : il n'y a pas de système *objectivement* émergent ; il n'y a d'émergence que *relativement* à une façon de connaître ou de décrire une exécution particulière. Selon cette approche, l'analyse de l'émergence ne consiste pas à observer passivement les caractéristiques macroscopiques des systèmes, mais à les *faire-émerger* [26] en élaborant des descriptions adéquates. L'analyse repose donc sur un processus actif visant à abstraire les caractéristiques de l'exécution.

Il y a de très nombreuses façons de décrire et d'abstraire une même exécution. Nous pensons comme Bedau [1] que, dans la foule des phénomènes émergents, beaucoup ne méritent pas notre attention. L'enjeu est alors de faire-émerger des caractéristiques macroscopiques utiles. Dans une perspective pragmatique [25, 7], la pertinence d'une description émergente est toujours évaluée en fonc-

tion du contexte particulier de l'analyse et des objectifs scientifiques sous-jacents.

L'*émergence épistémique* répond aux trois exigences formulées par Bedau [1] concernant la conceptualisation de l'émergence (pour une discussion plus détaillée des points suivants, le lecteur pourra se référer à nos autres travaux [14]).

1. Elle est *cohérente avec le matérialisme* [1] : toute description d'une exécution est réductible *en principe* aux dynamiques de ses agents. Outre un engagement ontologique sur la structure de la réalité, nous exprimons une exigence méthodologique : le *monisme microscopique* [14], selon lequel le processus d'abstraction doit reposer uniquement sur les entités microscopiques du SMA.
2. Elle est *scientifiquement utile* : elle permet en effet d'abstraire les caractéristiques de l'exécution selon un point de vue macroscopique. La seconde exigence méthodologique que nous formulons est le *non-éliminativisme* [14] : malgré le monisme microscopique, l'analyse des SMA ne doit pas se limiter à une description microscopique. Elle ne doit pas réduire les abstractions, mais au contraire en produire de fécondes (*cf.* Kistler [12] pour les enjeux épistémologiques du non-éliminativisme).
3. Elle explique comment les phénomènes émergents peuvent être à la fois *engendrés* par les dynamiques microscopiques et *autonomes* vis-à-vis de ces dynamiques. En effet, le puzzle formulé par Bedau [1] est résolu par l'émergence épistémique, dans la mesure où les phénomènes émergents sont réductibles au niveau microscopique, tout en constituant pour l'observateur un niveau de description où les abstractions acquièrent une autonomie épistémique et un intérêt authentique pour l'analyse.

2.2 Positionnement

Le *monisme microscopique* implique un rejet des définitions de l'émergence reposant sur l'existence d'entités macroscopiques autonomes. Dans les travaux de Gil-Quijano [10], la définition de l'émergence repose sur des « SMA multi-modèles » : plusieurs niveaux de modélisation inter-dépendants sont synchronisés et maintenus cohérents pendant la simulation. Autre exemple : les « systèmes à tableau noir » (*blackboard systems*) incluent des espaces de mémoire partagée que l'on peut assimiler à des entités macroscopiques. Pour Sawyer [22],

un SMA est « émergent » lorsque ces entités ont une influence causale sur le niveau microscopique, *i.e.*, les agents (*cf.* également l'analyse de Deguet [6]). Ces deux conceptualisations ne sont pas compatibles avec le monisme et ne peuvent être appliquées aux SMA entièrement microscopiques, décentralisés et asynchrones. Au contraire, l'émergence par auto-organisation de fonctions locales (*cf.* Picard [20]) est un très bon exemple de conceptualisation compatible avec le monisme microscopique.

De nombreux travaux défendent une conception *relativiste* (ou *subjectiviste*) de l'émergence (*e.g.*, à travers la notion de « surprise » [21], en fonction d'appareils de détection [2] ou par des grammaires de modèles [13]). Cette conception, que nous défendons également, s'oppose à d'autres travaux qui souhaitent donner une définition *objective* de l'émergence, c'est-à-dire indépendante de la méthode d'analyse effectivement employée (*cf.* par exemple [5, 1]). Nous pensons que ces conceptualisations manquent une qualité essentielle des phénomènes émergents : ceux-là peuvent être caractérisés de multiples façons, chacune introduisant une sémantique potentiellement pertinente pour l'analyse. L'exigence du *non-éliminativisme* s'oppose à ces approches car elles réduisent l'émergence à une caractéristique objective microscopique.

2.3 Formalisation

La formalisation présentée dans cette section généralise les travaux de Bonabeau et Dessalles [2] et répond aux exigences que nous avons exprimées. Elle repose sur les notions d'*exécution*, de *description* et de *complexité*.

Soit X un ensemble d'*executions* d'un SMA s donné. Soit D un ensemble de *descriptions formelles* permettant de représenter les exécutions de s . Des *dispositifs descriptionnels* de s $\delta_1, \dots, \delta_k$ sont des fonctions associant à chaque exécution $x \in X$ une description $d \in D$. Pour une exécution x donnée, les images $d_1 = \delta_1(x), \dots, d_k = \delta_k(x)$ sont des *descriptions* de x . Une *fonction de complexité* C est une fonction de D vers $[0, +\infty[$.

On dit qu'*il y a émergence* d'une description d_i par rapport à une description d_j si, et seulement si, $C(d_i) < C(d_j)$. On dit alors que d_i est *macroscopique* par rapport à d_j et on note $\rho = C(d_j)/C(d_i)$ le *taux d'émergence* entre les deux descriptions. La fonction de complexité C détermine donc entièrement les niveaux d'émer-

gence. Dans un contexte pragmatique, son choix dépend du SMA étudié et des objectifs de l'analyse : il n'existe pas de fonctions de complexité génériques. Cependant, nous gardons en tête que ce choix est crucial pour garantir l'utilité et la pertinence des descriptions engendrées.

Sur un ensemble d'exécutions X , le *taux d'émergence moyen* $\overline{\rho_X}$ entre deux dispositifs est la moyenne géométrique des taux d'émergences pour chaque exécution :

$$\log(\overline{\rho_X}) = \frac{1}{|X|} \sum_{x \in X} \log(C(\delta_j(x)) - \log(C(\delta_i(x))).$$

Les dispositifs descriptionnels sont donc évalués sur des ensembles d'exécutions. *E.g.*, un dispositif peut être *macroscopique en moyenne* par rapport à un autre sur un ensemble $X_1 \subset X$ (si $\overline{\rho_{X_1}} > 1$) et *microscopique en moyenne* sur un second ensemble $X_2 \subset X$ (si $\overline{\rho_{X_2}} < 1$).

Cette formalisation peut enfin être vue comme une généralisation de celle proposée par Bonabeau et Dessalles [2]. L'émergence y est définie comme un « saut de complexité » dans l'observation réalisée par une hiérarchie de détecteurs. Formellement : *il y a émergence* lorsque $C_{t+dt}(\delta_1(x), \dots, \delta_{k-1}(x), \delta_k(x), T) < C_t(\delta_1(x), \dots, \delta_{k-1}(x), T)$ où les δ_i sont des *détecteurs* et T des *outils de description*.

- Cette définition est restreinte à la notion d'émergence *diachronique* [24] (invisible à l'instant t , elle apparaît à $t+dt$). Nous généralisons à la notion d'émergence *synchronique* (elle peut être envisagée de manière atemporelle, à un instant t fixé).
- Contrairement à Bonabeau et Dessalles, nous ne différencions pas les détecteurs $\delta_1, \dots, \delta_k$ des outils de descriptions T . De notre point de vue, les détecteurs sont des *cas particuliers* de dispositifs descriptionnels.
- En remarquant que l'union de détecteurs forme également un dispositif descriptionnel, nous disposons d'une algèbre d'ensemble sur les détecteurs. On note $\delta_a = \delta_1 \cup \dots \cup \delta_k$ et $\delta_b = \delta_1 \cup \dots \cup \delta_{k-1}$.

La formule de l'émergence de Bonabeau et Dessalles [2] peut donc être ainsi résumée : *il y a émergence* lorsque $C(\delta_a(x)) < C(\delta_b(x))$ avec $\delta_b \subset \delta_a$. Aux notations près, on retrouve un cas particulier de notre propre formalisation.

2.4 Complétude, fermeture et cohérence

Nous définissons trois contraintes concernant les descriptions formelles engendrées afin de garantir leur pertinence scientifique.

Complétude La description ne doit pas dissimuler involontairement des portions d'espace ou de temps de l'exécution. (Elle peut par contre en éliminer certains détails.)

Fermeture La description ne doit pas représenter des événements qui n'ont pas eu lieu.

Cohérence La structure de la description doit correspondre « d'une certaine manière » à la structure réelle de l'exécution.

Les notions de complétude, de fermeture et de cohérence sont définies en fonction des SMA étudiés, de la méthode de description utilisée et des objectifs de l'analyse. Cette approche pragmatique de l'émergence nous empêche à ce stade de donner des définitions génériques plus développées. La section 3.2 les définit dans le cas d'une analyse causale de l'exécution via des diagrammes interactionnels. La section suivante donne une illustration plus simple à partir de descriptions par listes.

2.5 Exemple préliminaire

Soit s une supercolonie de fourmis (*e.g.*, le modèle développé par Gil-Quijano [10]). Soit X un ensemble d'exécutions. Les descriptions D sont des listes de couples (a_1, a_2) , où a_1 et a_2 désignent des agents. Le couple est interprété « a_1 interagit avec a_2 ».

Un dispositif descriptionnel $\delta : X \rightarrow D$ est *complet* ssi les descriptions qu'il engendre n'omettent pas d'espaces ou de périodes de temps durant lesquels les fourmis interagissent. δ est *fermé* ssi les couples correspondent à des interactions ayant réellement lieu dans l'exécution. δ est *cohérent* ssi les interactions sont listées dans l'ordre chronologique. δ peut agréger un ensemble d'interactions à l'aide d'un seul couple (a_1, a_2) . a_1 et a_2 peuvent donc être interprétés comme des fourmis, des colonies ou des supercolonies.

Soit δ_f un dispositif qui associe à chaque exécution x la liste complète des interactions entre toutes les fourmis. Soit δ_c un dispositif qui associe à x la liste des interactions de groupes de fourmis ayant les mêmes caractéristiques génétiques (elles forment alors ce qu'on appelle des colonies [10]). Soit C la fonction de complexité qui associe à une description d le nombre de couples dans sa liste. $\forall x \in X$, on a $C(\delta_f(x)) > C(\delta_c(x))$. On dit alors que $\delta_c(x)$ est une description macroscopique par rapport à $\delta_f(x)$ et que δ_c est un descripteur macroscopique sur X par rapport à δ_f .

3 Causalité et agrégations

Cette section répond au problème (2) formulé en introduction. Elle propose un formalisme de *description formelle* pour modéliser la causalité au sein des exécutions des SMA. Elle définit également des fonctions d'agrégation simplifiant la structure de ces descriptions dans le but de réduire leur complexité et d'engendrer des entités macroscopiques.

3.1 Description causale

Le domaine des systèmes distribués a développé des modèles pertinents pour décrire la structure causale des exécutions distribuées [3, 18, 9]. Dans cette section, nous nous appuyons sur ces travaux pour décrire et modéliser l'exécution des SMA. Les définitions suivantes sont notamment adaptées des travaux de Mattern [18].

Une *description causale* d de l'exécution d'un SMA s est caractérisée par un ensemble d'exécutions d'agents A_d et un ensemble d'interactions I_d . L'exécution d'un agent $a \in A_d$ est modélisée par une séquence ordonnée d'événements : événements d'interactions (émissions, réceptions ou interactions simultanées) ou événements de transitions dans l'état interne des agents. Cette séquence représente le *temps logique local* de l'agent a . Elle définit un ordre total sur E_a , l'ensemble des événements de son exécution. Cet ordre est noté $<_a$.

On note E_d l'ensemble des événements de la description causale (*i.e.*, l'union des E_a pour tout $a \in A_d$). On note a_d l'application qui associe à chaque événement de E_d sa position dans l'espace des agents A_d . La clôture transitive des ordres locaux et des relations causales entre agents (liées aux interactions) définit un ordre partiel sur E_d noté $<_d$. Il représente le *temps logique global* de la description. \parallel_d est la *relation d'indépendance causale* définie sur E^2 et telle que $e_1 \parallel_d e_2$ ssi $e_1 \not<_d e_2$ et $e_1 \not>_d e_2$.

Une *coupe* γ est un ensemble d'événements virtuels qui séparent l'ensemble d'événements E_d en deux sous-ensembles : $Passé_\gamma$ et $Futur_\gamma$. Une coupe est *consistante* lorsque l'ordre partiel $<_d$ est conservé entre ces deux sous-ensembles. Formellement : γ est *consistante* si, et seulement si, $\forall e_1 \in Passé_\gamma$ et $\forall e_2 \in Futur_\gamma$ nous avons $e_1 \not<_d e_2$. A chaque description d , on associe un ensemble de coupes consistantes Γ_d partitionnant le temps de l'exécution en *intervalles simples*, *i.e.* tels que les événements

dans un même intervalle sont causalement indépendants. On note $<_{\Gamma_d}$ l'ordre partiel induit sur Γ_d par $<_d$.

Les descriptions causales peuvent être représentées par des *diagrammes d'interactions* (aussi appelés *diagrammes temporels* par Mattern [18]). La figure 1 présente les diagrammes de quatre descriptions causales : les exécutions d'agents sont des lignes horizontales, les événements sont des graduations, les interactions des flèches et les coupes consistantes de Γ_d des courbes verticales en pointillés.

Remarquons que l'environnement d'un SMA peut également être modélisé par ce formalisme. Il s'agit de décomposer cet environnement en entités passives, appelées *artefacts*, manipulables par les agents (*cf.* le *framework* développé par Viroli et Omicini [27]). Les exécutions de ces artefacts sont ensuite modélisées de la même manière que celles des agents, *i.e.* par des séquences d'événements et d'interactions.

3.2 Cohérence, complétude et fermeture

Soit x une exécution d'un SMA s . Nous définissons une *transformation* de descriptions causales T comme un triplet (d, d', τ) où d et d' sont des descriptions causales de x – respectivement la description *source* et la description *cible* – et τ est une application de E_d vers $E_{d'}$. Soient H et H' des sous-ensembles de E_d et $E_{d'}$.

- T est *cohérente* sur H ssi l'ordre global n'est pas inversé par la transformation :
 $\forall (e_1, e_2) \in H^2, e_1 <_d e_2 \rightarrow \tau(e_1) \not<_{d'} \tau(e_2)$.
- T est *complète* sur H si, et seulement si, tous les événements et toutes les interactions dans H ont un événement ou une interaction associée dans $I_{d'}$.
- T est *fermée* sur H' si, et seulement si, tous les événements dans H' ont une préimage par τ et si toutes les interactions dans H' ont une interaction associée dans I_d .

Nous appelons *description causale microscopique* d'une exécution x l'unique description causale modélisant *tous* les agents, événements et interactions effectivement exécutés, et cela « dans le bon ordre ». Elle est ici notée d_μ . Par abus de langage, l'unique dispositif descriptionnel d'un SMA s qui associe à chaque exécution sa description microscopique est nommé *dispositif descriptionnel microscopique*. Il est noté δ_μ .

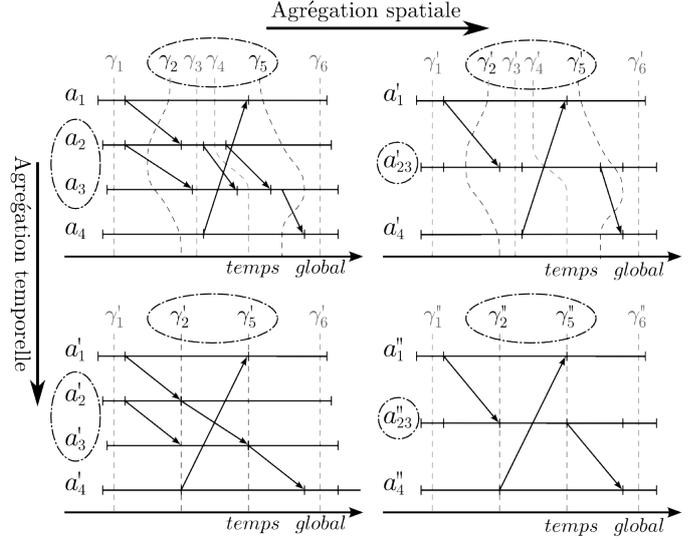


FIGURE 1 – Diagrammes et agrégations

La cohérence, la complétude et la fermeture des descriptions causales sont définies par rapport à la description microscopique. Ainsi, une description causale d est cohérente (*resp.* complète, fermée) si, et seulement si, il existe une transformation T de d_μ vers d qui est cohérente sur E_{d_μ} (*resp.* complète sur E_{d_μ} , fermée sur E_d).

3.3 Agrégations

Les agrégations sont des transformations permettant de simplifier la description causale d'une exécution et de réduire la taille de cette description en espace, en temps et/ou en nombre d'interactions. Les « agrégats » qu'elles engendrent (groupes d'agents, intervalles de temps, ensembles d'interactions, *etc.*) sont interprétés comme des entités macroscopiques pour lesquelles la connaissance des dynamiques internes n'est pas nécessaire à la compréhension globale de l'exécution. Les agrégations permettent donc de faire-émerger des abstractions utiles à l'analyse. Dans cette section, nous donnons un cadre formel à ces transformations particulières.

Soit T une transformation cohérente et complète sur E_d , fermée sur $E_{d'}$.

- T est *spatialement invariante* sur H si, et seulement si, les applications a sont τ -invariantes sur H , *i.e.* $\forall (e_1, e_2) \in H^2$:

$$a_d(e_1) = a_d(e_2) \rightarrow a_{d'}(\tau(e_1)) = a_{d'}(\tau(e_2)) ;$$

$$a_d(e_1) \neq a_d(e_2) \rightarrow a_{d'}(\tau(e_1)) \neq a_{d'}(\tau(e_2)).$$

– T est *temporellement invariante* sur H si, et seulement si, les relations $<$ et \parallel sont τ -invariantes sur H , i.e. $\forall (e_1, e_2) \in H^2$:

$$e_1 <_d e_2 \quad \rightarrow \quad \tau(e_1) <_{d'} \tau(e_2) ;$$

$$e_1 \parallel_d e_2 \quad \rightarrow \quad \tau(e_1) \parallel_{d'} \tau(e_2).$$

– T est *spatialement agrégative* sur H si, et seulement si, $\exists (e_1, e_2) \in H^2$ tel que :

$$a_d(e_1) \neq a_d(e_2) \quad \text{et} \quad a_{d'}(\tau(e_1)) = a_{d'}(\tau(e_2)).$$

– T est *temporellement agrégative* sur H si, et seulement si, $\exists (e_1, e_2) \in H^2$ tel que :

$$e_1 <_d e_2 \quad \text{et} \quad \tau(e_1) \parallel_{d'} \tau(e_2).$$

Soit E_α un sous-ensemble de E_d que nous nommons *agrégat* d'évènements. Dans la suite de cet article, nous nous intéressons aux transformations qui sont :

- cohérentes et complètes sur E_d ;
- fermées sur $E_{d'}$;
- invariante en espace et en temps sur $E_d \setminus E_\alpha$;
- agrégative en espace et/ou en temps sur E_α .

Nous appelons ces transformations particulières des *agrégations*. Elles transforment la description causale de l'exécution en remplaçant la structure de l'agrégat par une structure plus simple. Des groupes d'interactions et d'évènements sont synthétisés par une unique interaction, ou par un unique évènement. La figure 1 montre une fonction d'agrégation spatiale (deux agents sont abstraits en un unique agent) et une fonction d'agrégation temporelle (trois intervalles simples sont abstraits en un unique intervalle simple). L'espace logique des agents et l'espace temporel de l'exécution sont réduits par les agrégations. Par conséquent, elles induisent une perte d'information et une diminution de la complexité des descriptions (cf. section suivante). Les agrégats définissent les contours spatiaux et temporels des abstractions engendrées par ce changement de niveau. L'objectif de l'agrégation est alors de réduire la complexité en conservant le maximum d'informations utiles afin de produire des abstractions efficaces pour l'analyse.

Complexité

spatiale

temporelle

spatio-temporelle

interactionnelle

Ressources nécessaires pour stocker et parcourir

l'ensemble des agents (agrégés sur un intervalle simple)

les intervalles simples (agrégés sur un unique agent)

les exécutions complètes de tous les agents

l'ensemble des interactions

Notation

$$C_s(d) = \mathcal{O}(|A_d|)$$

$$C_t(d) = \mathcal{O}(|\Gamma_d|)$$

$$C_{st}(d) = \mathcal{O}(|E_d|)$$

$$C_i(d) = \mathcal{O}(|I_d|)$$

3.4 Complexité et réduction

Dans cette section, nous définissons des fonctions de complexité pour les descriptions causales. Elles concernent les quantités de ressources nécessaires en espace et en temps de calcul pour stocker et parcourir une description donnée. Par exemple, la *complexité spatiale* concerne les ressources nécessaires pour stocker et parcourir l'ensemble des agents, leurs exécutions étant agrégées sur un unique intervalle simple. La figure 2 présente d'autres fonctions de complexité qui nous seront utiles.

L'objectif de ces mesures est d'évaluer le coût d'une analyse reposant sur une description ou un dispositif descriptionnel donné. Pour des SMA complexes, une analyse microscopique est souvent très difficile ou très coûteuse en calculs. Outre l'apport sémantique du processus d'abstraction, les agrégations permettent d'établir un compromis entre la quantité d'informations disponibles et les ressources effectivement allouées à l'analyse (i.e., espace mémoire, puissance et temps de calcul). Dans cette optique, le coût de l'étape d'agrégation doit être envisagé comme un coût *préliminaire* à l'analyse. Dans la section suivante, nous présentons une approche permettant de réduire ce coût préliminaire en distribuant le calcul de l'agrégation dans l'espace et dans le temps.

Les fonctions de complexité utilisées orientent le processus d'agrégation. Il est possible de préciser cette orientation avec des fonctions plus sophistiquées. Par exemple, une *complexité interactionnelle relative* :

$$C_{i/s \times t}(d) = C_i(d) / \sqrt{C_s(d) \times C_t(d)}$$

conduit à agréger les parties de l'exécution qui sont les plus inter-connectées (les agents interagissant le plus ensemble ou les ensembles d'intervalles les plus riches en interactions).

Ces mesures sont utilisées dans la section 4.4 pour évaluer les descriptions de l'activité simulée d'une colonie de fourmis. Dans le cas d'une description microscopique, C_s est proportionnelle au nombre de fourmis, C_t au nombre de

FIGURE 2 – Quelques fonctions de complexité

pas de la simulation et C_i au nombre d'interactions entre les fourmis (par dépôt de phéromones). Des sondes macroscopiques permettent également de collecter des données concernant l'activité d'un groupe de fourmis sur un intervalle de temps plus large (*cf.* section 4.2). Dans ce cas plus général, C_s est proportionnelle au nombre de sondes utilisées pour la collecte, C_t au nombre de fois où les sondes sont synchronisées et C_i au nombre des interactions inter-sondes (on parle alors de flux d'activité).

4 Observation macroscopique

Cette section s'attaque au problème (3), *i.e.* aux exécutions de SMA de très grande taille. Elle propose une approche par *observation macroscopique* pour réaliser le passage à l'échelle des méthodes d'agrégation proposées dans la section précédente. Des expériences illustrant cette approche sont présentées afin de la valider sur un modèle simple de colonie de fourmis.

4.1 Travaux antérieurs

Les méthodes d'observation classiques pour l'analyse des SMA peuvent être qualifiées de *microscopiques*. Elles ont recours en effet à l'implémentation de dispositifs descriptifs microscopiques. Par exemple, les approches par analyse de traces d'exécution pour le *monitoring* de systèmes distribués procèdent en trois étapes [11] (représentées dans la figure 3).

1. Collecte des données microscopiques lors de l'exécution. Cette étape rencontre de premiers obstacles liés à la décentralisation des données à collecter et à leur asynchronisme (problème de datation des événements [4]).
2. Traitement *post-mortem* des données collectées afin de faire-émerger des caractéristiques macroscopiques.

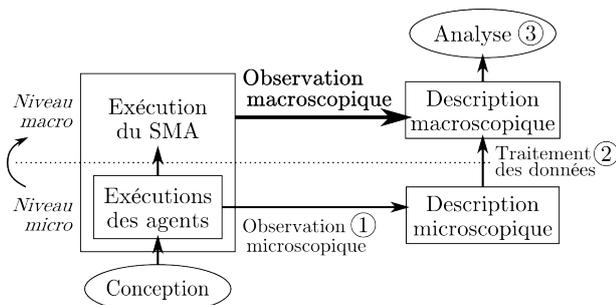


FIGURE 3 – Observation macroscopique

3. Analyse de l'exécution à partir des caractéristiques macroscopiques engendrées. Elles sont souvent présentées à l'aide de méthodes graphiques sophistiquées [11, 23].

Les approches par simulation procèdent de la même façon (*e.g.*, les travaux de Louie et Carley [16]). Elles évitent cependant les difficultés de l'étape (1) (collecte des données) en centralisant et synchronisant l'exécution du SMA à l'aide d'une plate-forme de simulation.

L'étape (2) (traitement des données) présente, pour les deux approches, une difficulté majeure liée à la taille des données à traiter. En effet, le calcul des caractéristiques macroscopiques repose sur l'analyse des exécutions d'agents et de leurs interactions. Dans des systèmes complexes de très grande taille, exécutés sur de longues périodes de temps, le nombre des interactions devient très rapidement ingérable. Dans le pire des cas, il est en $\mathcal{O}(|A_{d_\mu}|^2 \times |\Gamma_{d_\mu}|^2)$. Les SMA récents auxquels s'intéresse l'IA, comme par exemple les Systèmes d'Information Géographique, comprennent des millions d'agents et d'intervalles simples. Pour cette raison, les approches classiques peinent à analyser ces systèmes et passent très mal à l'échelle.

4.2 Macro-sondes et temps distribué

Le calcul des fonctions d'agrégation pour réduire la complexité des descriptions causales a également un coût non négligeable. Appliquer les agrégations à des informations microscopiques (obtenues par collecte de traces ou par simulation) ne ferait que déplacer le problème du passage à l'échelle. Nous proposons une approche par *observation macroscopique* pour dépasser ce problème (*cf.* figure 3). Il s'agit d'implémenter des dispositifs qui produisent *directement* des descriptions macroscopiques de l'exécution. La collecte des données engendre *directement* des abstractions et permet d'économiser l'étape de traitement. La méthode d'agrégation peut ainsi être appliquée aux SMA de très grande taille.

L'idée principale de notre approche consiste à distribuer le calcul des descriptions macroscopiques au sein du SMA. L'agrégation des données est donc réalisée par l'ensemble des agents, au cours de l'exécution, afin de répartir le coût du calcul dans l'espace et dans le temps : les agents du système participent à leur propre observation. Leurs comportements peuvent cependant être perturbés par le processus d'observation et le SMA peut diverger de sa trajec-

toire authentique. Nous sommes parfaitement conscients des effets de sondes propre à cette approche. Nous les étudions actuellement sur la base de travaux antérieurs [4].

Agrégation spatiale. À un niveau de description microscopique, un évènement est précisément localisé dans l'espace (exécution d'un agent) et dans le temps (date globale). On peut donc le représenter par un couple $(agent, date)$. Une agrégation spatiale consiste à partitionner l'espace A_d de la description en groupes d'agents. Les évènements sont alors localisés en fonction de cette partition. On appelle *sonde macroscopique* tout dispositif qui fait l'interface entre un groupe d'agents et un observateur. Ces dispositifs collectent et agrègent les données microscopiques qui leur sont transmises par les agents du groupe. Un dispositif de description macroscopique peut ainsi utiliser un système de sondes pour partitionner l'espace et centraliser les informations des différentes parties. Les évènements décrits sont alors représentés par un couple $(Sonde, date)$.

Agrégation temporelle. L'agrégation temporelle consiste à partitionner l'ensemble des intervalles simples définis par Γ_d en groupes d'intervalles (situés entre deux coupes). Une coupe peut être représentée de manière distribuée par des *compteurs de coupe* propres à chaque agent. La valeur de ce compteur identifie la position temporelle de l'agent, c'est-à-dire l'intervalle

au sein duquel à lieu son exécution. Pour garantir la consistance des coupes distribuées, il est possible d'utiliser les astuces développées par Chandy et Lamport pour le *snapshot algorithm* [3]. Il s'agit de coordonner les compteurs de coupes à l'aide des relations causales entre agents : lors de chaque interaction, l'agent émetteur transmet également la valeur de son compteur. L'agent récepteur peut alors synchroniser sa position temporelle afin que l'interaction ne remonte pas le cours du temps. En utilisant les compteurs de coupe pour dater les évènements, les données collectées sont de la forme $(agent, Intervalle)$. Enfin, en combinant l'utilisation de sondes macroscopiques et de temps distribués, les évènements $(Sonde, Intervalle)$ sont situés dans un espace et un temps agrégés.

4.3 Expérimentations

Cette section présente des expériences préliminaires réalisées pour illustrer et tester notre approche sur un problème simple (une évaluation sur des problèmes de plus grande taille et de plus grande complexité est en cours). Les expérimentations ont été réalisées sur la plate-forme de simulation *MASON*, spécialement conçue pour simuler des SMA de très grande taille [17]. Nous avons utilisé pour cette évaluation le modèle de colonie de fourmis *AntFarm* disponible sur *MASON* (cf. les travaux de Drogoul [8] pour une introduction à ces SMA classiques). Les caractéristiques macroscopiques que nous voulons

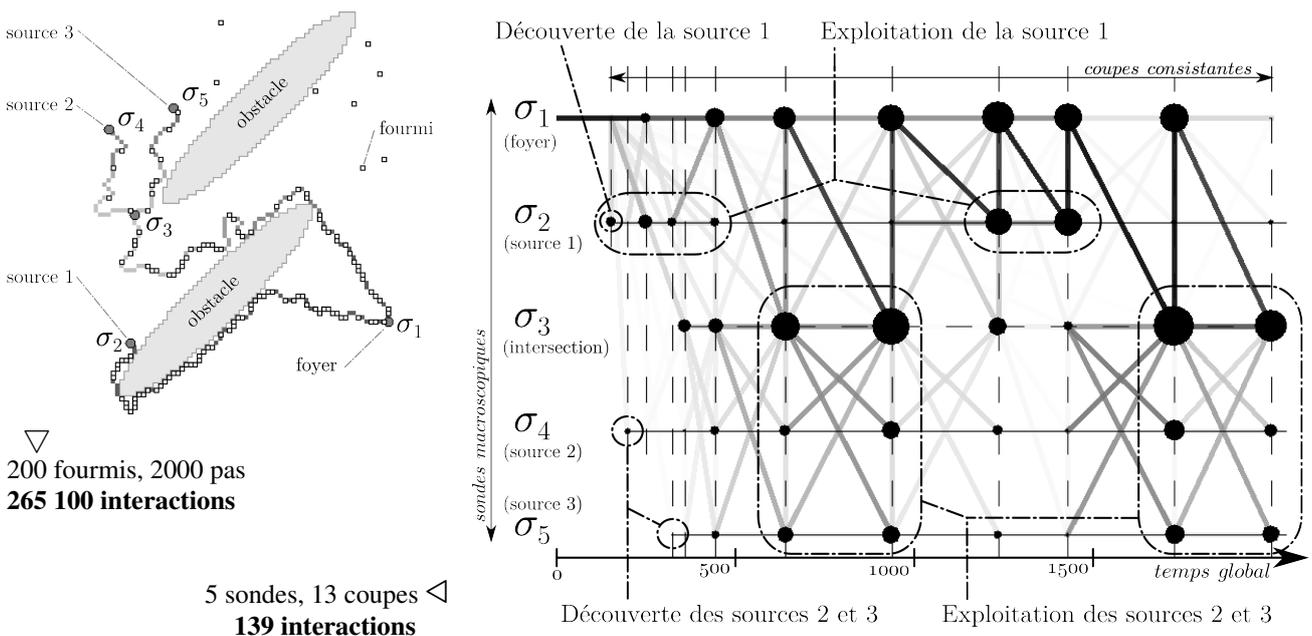


FIGURE 4 – (a) une colonie de fourmis et (b) sa description macroscopique

y faire-émerger sont (1) la création de pistes de phéromones et (2) l'exploitation des sources de nourriture par la colonie. Pour cela, nous avons implémenté le dispositif descriptionnel macroscopique δ_M suivant. (Cf. notre précédent rapport de recherche pour plus de détails concernant l'implémentation de ce dispositif [15].)

Agrégation spatiale. Des sondes sont disposées au niveau du foyer, des sources de nourriture et de l'intersection des pistes de phéromones (cf. les σ_i figure 4.a). Elles constituent l'ensemble A_{d_M} des agents de la description macroscopique (traits horizontaux dans le diagramme d'interactions de la figure 4.b). Les déplacements individuels des fourmis et leurs interactions ne sont pas disponibles dans cette description. Nous disposons à la place d'un ensemble E_{d_M} d'agrégats d'évènements (disques noirs) et d'un ensemble I_{d_M} d'agrégats d'interactions entre les sondes (traits diagonaux).

Agrégation temporelle. Chaque fourmi et chaque sonde disposent d'un *compteur de coupe* afin de se positionner dans les intervalles macroscopiques de l'exécution, définis entre les coupes de Γ_{d_M} (pointillés verticaux, figure 4.b). Ces coupes sont initiées au niveau du foyer et synchronisées lors des interactions entre fourmis et entre sondes. Les évènements E_{d_M} et les interactions I_{d_M} sont agrégés en fonction de leur date dans Γ_{d_M} . Ils donnent des informations globales sur des périodes de temps macroscopiques.

Dans la figure 4.b, la taille des disques noirs représente le nombre de fourmis ayant rencontré une sonde pendant un intervalle de temps. La noirceur des traits représente l'intensité des interactions entre deux sondes sur un intervalle donné. Les interactions sont finalement interprétées comme des flux d'activité entre deux points d'intérêt dans l'environnement.

4.4 Résultats

Les résultats présentés dans cette section ont été obtenus à partir de $|X| = 100$ exécutions d'un SMA s contenant 200 agents (fourmis non-déterministes) exécutés sur MASON pendant 2000 pas de simulation. Le SMA a été à chaque fois confronté à la même configuration de l'environnement (cf. figure 4.a). Les exécutions ont été observées par deux dispositifs indépendants : un dispositif d'*observation microscopique* δ_μ et le dispositif d'*observation macroscopique* δ_M présenté précédemment. L'utilisation d'une plate-forme de simulation permet

en outre de garantir la conservation des comportements des agents par ces dispositifs. Voici les moyennes des mesures obtenues sur les 2×100 descriptions engendrées (les écarts-types σ sont indiqués à droite) :

	Dispositif δ_μ	Dispositif δ_M	
$\overline{ A_d }$	200 fourmis	6,7 sondes	($\sigma = 2,2$)
$\overline{ \Gamma_d }$	2 000 pas	18 coupes	($\sigma = 2,4$)
$\overline{ I_d }$	310 000 inter.	240 flux	($\sigma = 130$)
	\hookrightarrow ($\sigma = 13\ 000$)		

Voici les taux d'émergence moyens entre δ_μ et δ_M obtenus sur X pour les fonctions de complexité introduites dans la section 3.4 :

Spatiale C_s	$\overline{\rho_X} = 32$	($\sigma_X = 1,4$)
Temporelle C_t	$\overline{\rho_X} = 110$	($\sigma_X = 1,1$)
Interactionnelle C_i	$\overline{\rho_X} = 1500$	($\sigma_X = 1,7$)
Relative $C_{i/s \times t}$	$\overline{\rho_X} = 25$	($\sigma_X = 1,4$)

Les descriptions macroscopiques engendrées par le dispositif δ_M sont bien moins coûteuses à analyser que les descriptions microscopiques engendrées par δ_μ . En moyenne, elles présentent 32 fois moins d'agents et 110 fois moins d'intervalles de temps. Le nombre d'interactions par agent et par intervalle de temps est réduit d'un facteur 25 en moyenne. (Cf. le rapport [15] pour plus de détails et pour d'autres résultats.)

Malgré la perte d'information (1500 fois moins d'interactions représentées en moyenne), les descriptions macroscopiques permettent de rendre compte des phénomènes émergents que nous voulons analyser : création des pistes et exploitation des sources de nourriture (cf. figure 4.b). Ainsi, avec un dispositif bien moins coûteux, et sans traitement *post-mortem* des données collectées, nous rendons compte de certaines caractéristiques macroscopiques des exécutions. Remarquons que l'observation et l'analyse microscopique d'une colonie de 200 fourmis est facilement réalisable aujourd'hui. Dans ces expériences, la description obtenues par δ_M ne révèle donc rien qui n'aurait pu être observé par δ_μ (à un coût bien plus grand). Cependant, lorsqu'on augmente (1) la taille de la colonie, (2) la durée de la simulation et (3) la complexité de l'environnement (sources, obstacles, etc.) une observation complète devient difficile. Notre approche dépasse cette difficulté et devrait permettre, à l'avenir, d'observer des phénomènes nouveaux à très grande échelle.

5 Bilan et perspectives

Dans cet article, nous avons caractérisé l'émergence relativement à la notion de dispositif descriptif. Le *taux d'émergence moyen* entre deux dispositifs est lui-même défini relativement à une fonction de complexité (section 2). Nous avons élaboré des outils de description formelle pour modéliser les relations de causalité au sein de l'exécution des SMA. Nous avons également défini des opérations d'agrégation sur ces *descriptions causales*, ainsi que des fonctions de complexité, afin d'engendrer des informations macroscopiques (section 3). Enfin, nous avons présenté une approche pour implémenter des dispositifs descriptifs engendrant *directement* des descriptions macroscopiques. Cette approche repose sur la conception de sondes et d'algorithmes distribués pour observer les exécutions à moindre coût (section 4).

Nous avons validé cette approche sur une application simple : les colonies de fourmis. Dans l'optique de développer des outils génériques pour l'analyse et la conception de SMA de très grande taille, il est néanmoins nécessaire de montrer que cette approche peut être utilisée sur une plus grande classe de systèmes. Nous travaillons actuellement sur des SMA en Information Géographique : plus grands, plus complexes et moins contrôlés. Ces expérimentations devraient confirmer et généraliser la validité de notre approche et son intérêt pour l'analyse et la conception de SMA de très grande taille.

Références

- [1] M. A. Bedau, Weak Emergence, *Philosophical Perspectives*, vol. 11, p. 375–399, 1997.
- [2] É. Bonabeau et J.-L. Dessalles, Detection and Emergence, *Intellectica*, vol. 25, n°2, p. 85–94, 1997.
- [3] K. M. Chandy et L. Lamport, Distributed Snapshots : Determining Global States of Distributed Systems, *ACM Transactions on Computer Systems*, vol. 3, p. 63–75, 1985.
- [4] J. Chassin de Kergommeaux, É. Maillet et J.-M. Vincent, Monitoring Parallel Programs for Performance Tuning in Cluster Environments, *Parallel Program Development for Cluster Computing*, p. 131–150, Nova Science Publishers, 2001.
- [5] V. Darley, Emergent Phenomena and Complexity, *Artificial Life*, vol. 4, p. 411–416, 1994.
- [6] J. Deguet, Y. Demazeau et L. Magnin, Element about the Emergence Issue : A Survey of Emergence Definitions, *ComPlexUs*, vol. 3, p. 24–31, 2006.
- [7] J.-L. Dessalles, J. Ferber et D. Phan, Emergence in Agent-Based Computational Social Science, *Intelligent Complex Adaptive Systems*, vol. 24, p. 255–299, 2008.
- [8] A. Drogoul, B. Corbara et S. Lal, MANTA : New Experimental Results on the Emergence of (Artificial) Ant Societies, *Artificial Societies*, p. 190–211, UCL Press, 1995.
- [9] C. Fidge, Logical Time in Distributed Computing Systems, *Computer*, vol. 4, p. 28–33, 1991.
- [10] J. Gil-Quijano, G. Hutzler et T. Louail, Accroche-toi au niveau, j'enlève l'échelle, *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 24, n°5, p. 625–648, 2010.
- [11] H. Joumaa, Y. Demazeau et J.-M. Vincent, Performance Visualization of a Transport Multi-agent Application, *PAAMS-2009*, vol. 55, p. 188–196,
- [12] M. Kistler, La Réduction, l'émergence, l'unité de la science et les niveaux de réalité, *Matière Première*, vol. 2, p. 67–97, 2007.
- [13] A. Kubík, Toward a Formalization of Emergence, *Artificial Life*, vol. 9, p. 41–65, 2003.
- [14] R. Lamarche-Perrin, Conceptualisation de l'émergence : dynamiques microscopiques et analyse macroscopique des SMA, en cours de publication, *Plate-forme AFIA 2011 : atelier FUTURAMA*, 2011.
- [15] R. Lamarche-Perrin, Y. Demazeau et J.-M. Vincent, Macroscopic Observation of Multiagent Systems, *Laboratoire d'Informatique de Grenoble, RR-LIG-010*, mars 2011.
- [16] M. A. Louie et K. M. Carley, Balancing the Criticisms : Validating Multi-Agent Models of Social Systems, *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 16, n°2, p. 242–256, 2008.
- [17] S. Luke, C. Cioffi-Revilla, L. Panait, K. Sullivan et G. Balan, MASON : A Multi-agent Simulation Environment, *Simulation*, vol. 81, n°7, p. 517–527, 2005.
- [18] F. Mattern, Virtual Time and Global States of Distributed Systems, *Parallel and Distributed Algorithms*, p. 215–226, North-Holland, Elsevier, 1989.
- [19] T. O'Connor et H. Y. Wong, Emergent Properties, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/>, 2006.
- [20] G. Picard, *Méthodologie de développement de SMA adaptatifs et conception de logiciels à fonctionnalité émergente*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse III, décembre 2004.
- [21] E. M. A. Ronald et M. Sipper, Surprise versus unsurprise : Implications of emergence in robotics, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 37, n°1, p. 19–24, 2001.
- [22] R. K. Sawyer, Simulating Emergence and Downward Causation in Small Groups, *Multi-Agent-Based Simulation*, vol. 1979, p. 49–67, 2001.
- [23] L. M. Schnorr, *Some Visualization Models Applied to the Analysis of Parallel Applications*, Thèse de doctorat, Grenoble INP et Universidade Federal do Rio Grande do Sul, octobre 2009.
- [24] A. Stephan, Varieties of Emergentism, *Evolution and Cognition*, vol. 5, n°1, p. 49–59, 1999.
- [25] G. van de Vijver, Émergence et explication, *Intellectica*, vol. 25, n°2, p. 7–23, 1997.
- [26] F. Varela, E. Thompson et E. Rosch, *The Embodied Mind*, Cambridge, MA : MIT Press, 1991.
- [27] M. Viroli et A. Omicini, Modelling Agents as Observable Sources, *Journal of Universal Computer Science*, vol. 8, p. 423–452, 2002.