
Emergence et SMA

M. R. Jean *

Groupe de travail "Collectif" IAD/SMA de AFCET/AFIA

* Sylvie Pesty (Leibniz/IMAG Grenoble)
Eric Batard (LI Tours)
Christian Brassac (GRC Nancy)
Ludovic Delépine (GREYC Caen)
Marie-Pierre Gleizes (IRIT Toulouse)
Pierre Glize (IRIT Toulouse)
Ouiddad Labbani (LAB Besançon)
Charles Lenay (TSH/UTC Compiègne)
Pierre Marcenac (IREMIA La Réunion)
Laurent Magnin (LAFORIA Paris)
Jean-Pierre Müller (IIIA Neuchâtel)
Joël Quinqueton (LIRMM et INRIA Montpellier)
Pascal Vidal (GRASCE Marseille)

“ La poésie met le langage en état d’émergence ”

G. Bachelard (1957)

RESUME : Ce papier présente le fruit des réflexions du groupe de travail “SMA&collectif” de l’AFCET/AFIA. Son ambition est d’essayer de tracer la voie d’une approche émergentiste des systèmes multi-agents. Elle s’oppose à l’approche “classique” de résolution de problèmes pour laquelle la tâche globale de résolution est décomposée en sous-tâches. Le programme code alors les étapes de la résolution ; lors de l’exécution, le processus parcourt le chemin pré-défini, et ce, jusqu’à la solution. Dans l’approche “émergentiste” au contraire, le programme code les agents, l’environnement et les interactions ; lors de l’exécution, le processus construit le cheminement vers une solution. Pour ce faire, nous nous sommes intéressés au concept d’émergence dans divers domaines comme la philosophie, les sciences cognitives, l’économie/gestion ainsi qu’en informatique. Alors que la plupart des définitions reposent sur une absence de quelque chose, nous tentons une définition positive et constructive qui nous permet d’argumenter qu’il peut exister une alternative émergentiste aux méthodes classiques de la résolution de problèmes mais dont la méthodologie est encore à définir.

0. Avant-propos

Le groupe de travail "SMA&collectif" de l' AFCET/AFIA s'est réuni régulièrement pendant deux ans. C'est le fruit de ses réflexions et de son travail qui se trouve ici résumé en quelques pages. L'objectif premier était d'étudier les "phénomènes" survenant dans les "collectifs", que ceux-ci soient des collectifs de sujets naturels (groupe d'humains, meute de loups, colonie de fourmis...), soient des collectifs d'entités artificielles (équipe de robots footballeurs, agents logiciels...). Etudier ces phénomènes a conduit très rapidement le groupe à s'intéresser à la notion d'émergence et on peut constater aujourd'hui que l'usage du terme "émergence" gagne du terrain. Employé à l'origine par les philosophes, les biologistes et les physiciens pour caractériser le fait qu'une chose "sorte" d'une autre sans que celle-ci la produise à la manière dont une cause produit nécessairement un effet et suffise à en faire comprendre l'apparition, il n'est pas de domaine scientifique qui échappe à son attrait. Il s'agit en effet d'aborder les problèmes scientifiques d'une manière inverse à la démarche réductionniste habituelle en se référant aux propriétés émergentes de la nature. Ces propriétés émergentes sont d'ailleurs communément évoquées par le célèbre énoncé "le tout est plus que la somme des parties". Une telle évolution n'a évidemment pas épargné l'informatique notamment le domaine de l'Intelligence Artificielle Distribuée et des Systèmes Multi-Agents (SMA). En effet, il est généralement postulé dans le domaine multi-agent, que l'activité collective complexe observée au niveau du système est la résultante des interactions d'activités plus simples au niveau agent. L'émergence pouvant se révéler un moyen de passage entre l'activité du "micro-niveau" et celui du "macro-niveau", elle suscite un intérêt certain pour la conception multi-agent de systèmes artificiels.

Comme nous le verrons, le terme émergence est "pluri-défini" plutôt que mal défini et recouvre déjà deux aspects : aussi bien l'aspect statique (le fait que l'émergence est un résultat) que l'aspect dynamique (le fait que l'émergence est un processus).

Mais que recouvre ce terme exactement ? Pourquoi s'y intéresser ? Au terme de deux ans de réflexion, convaincus que la notion d'émergence est essentielle au domaine des Systèmes Multi-Agents, nous tenterons modestement d'y apporter notre éclairage (encore un ! pourrait-on nous arguer) dans cet article. Nous allons pour ce faire en présenter les définitions qui nous semblent les plus fécondes (sans prétendre à l'exhaustivité tant elles sont nombreuses !), les critiquer avant d'en proposer une nouvelle qui puisse offrir des perspectives dans le but de concevoir des SMA faisant émerger des comportements collectifs de résolution de problèmes.

1. Position du problème

Une approche traditionnelle en Intelligence Artificielle est de proposer des méthodes de résolution de problèmes en s'inspirant des stratégies qu'ont développé les systèmes naturels. Ces méthodes reposent le plus souvent sur une formalisation *a priori* du domaine du problème. Dans les domaines dynamiques et incertains, cette formalisation *a priori* devient difficile et requiert une capacité adaptative accrue. La nature semble avoir résolu ce problème par émergence de comportements collectifs qui s'auto-organisent à partir de la dynamique même des entités, par interactions entre eux et avec l'environnement. Malheureusement, la notion même d'émergence pose problème aussi bien pour le modélisateur que pour le concepteur. En effet, il n'existe pas pour le moment de définitions constructives de l'émergence qui est plutôt,

comme nous le verrons par la suite, définie par absence de “quelque chose”, que ce soit la composabilité, la prédictibilité, etc., quand la notion d'émergence n'est pas elle-même remise en cause.

En effet, la notion “d'émergence”, est parfois associée à une incompréhension ou “intuition” face à certains phénomènes observés dans la nature; elle est alors simplement écartée au profit d'une vision “réductionniste” des choses. Par exemple, Daniel Memmi [Memmi 96] restreint l'émergence à un problème de description et d'explication, et postule que les phénomènes émergents ne sont que des exemples parmi d'autres de la variété des explications scientifiques. En ce sens, l'émergence n'est pas dans les choses, mais dans le déplacement du regard porté sur les phénomènes. Toutefois, de notre point de vue, il est à noter que si le concept d'émergence permet de couvrir et d'expliquer certains phénomènes, habituellement inexplicables ou relevant du domaine de la “magie”, ces phénomènes préexistent à notre observation, explication et interprétation. En d'autres termes, l'émergence d'une entité, d'une structure, d'une fonction ou d'un processus est contenue dans le système indépendamment de notre regard comme observateur, mais c'est le changement de regard de l'observateur qui lui permet de percevoir cette émergence (et qui lui a valu la qualification d'émergent). Les fourmilières avec leur ponts et les termitières avec leur œuvres architecturales émergent dans la nature depuis des années... sans qu'il y ait présence d'observateur !

Mieux comprendre et exploiter ces phénomènes, dits émergents, doit alors fournir non seulement une approche alternative pour la modélisation informatique, mais également pour la résolution de problèmes. Cette approche, dont le principe est de construire un collectif d'agents, plongé dans un environnement, qui de par leurs interactions vont évoluer ensemble jusqu'à converger vers un état stable représentatif d'une solution, a été initiée par R.Brooks en Robotique [Brooks 89a, Brooks 89b, Brooks 91]. Elle s'oppose à l'approche “classique” de résolution de problème pour laquelle la tâche globale de résolution est décomposée en sous-tâches. Le programme code alors les étapes de la résolution ; lors de l'exécution, le processus parcourt le chemin pré-défini, et ce, jusqu'à la solution. Dans l'approche “émergentiste” au contraire, le programme code les agents, l'environnement et les interactions ; lors de l'exécution, le processus construit le cheminement vers une solution.

Un autre attrait de l'approche émergentiste est le pouvoir d'adaptation des phénomènes et des structures émergents aux aléas et changements de l'environnement. Ces phénomènes qui puisent leurs “ressources” dans l'interaction dynamique avec l'environnement, ne sont pas totalement dépendants ou restreints au substrat (un environnement donné). Ils s'en détachent par des propriétés et des régularités génériques applicables dans d'autres environnements. En réalité, l'environnement est là pour instancier des règles comportementales et structurales de base conduisant à l'émergence du phénomène global ; et bien évidemment, il ne peut y avoir émergence sans l'environnement. La bactérie qui d'un point de vue d'un observateur remonte un champ gradient vers une source de sucre, suivrait une source en déplacement sans pour autant nécessiter une adaptation du “programme” de conduite de la bactérie. Il est à noter que cette capacité d'adaptation aux changements extérieurs est immédiate car ne s'appuie pas sur une représentation interne ou sur une internalisation de la trace, et de ce fait, ne nécessite pas de réactualisation de données, de modification de représentation, ... Sur la base de ce concept “d'émergence” et à l'image de systèmes naturels émergents tels que les insectes sociaux, on peut par exemple, penser construire un collectif de robots miniatures (nécessitant peu d'intelligence et des capacités sensori-motrices limitées) qui pourraient s'introduire

dans des environnements hostiles ou inaccessibles à des robots conventionnels et réaliser des tâches complexes d'exploration, de maintenance... Dotés de quelques règles comportementales simples, il pourraient s'organiser dans l'espace ou adapter leur comportements en fonction des contextes et ainsi pallier les problèmes de robustesse et de flexibilité rencontrés habituellement avec les robots traditionnels...

Dans la communauté multi-agent francophone, le concept d'émergence a suscité depuis peu un certain intérêt parmi lesquels on peut citer J.Ferber [Ferber 95], A.Drogoul [Drogoul et al 92a, Drogoul et al 92b, Drogoul et Ferber 91 et 94], Y.Demazeau [Demazeau 93], N.Ferrand [Ferrand et al 97], L.Magnin [Magnin 96], P.Marcenac [Marcenac 96], J.P Müller [Müller et Pecchiari 96a et 96b] ou R.Marcelpoil et al [Marcelpoil et al 94]. Dans le domaine de la Vie Artificielle, citons les travaux de Deneubourg [Deneubourg et al 91a, 91b et 92], E.Bonabeau [Bonabeau et al 95, Bonabeau et Theraulaz 94], J.L.Dessalles, L.Steels [Steels 90 et 91]. Une mention toute particulière pour les deux articles de [Bonabeau et al 95] : "Characterizing emergent phenomena", qui donnent bon nombre d'exemples de phénomènes généralement considérés comme émergents et proposent un cadre d'étude pour une meilleure compréhension de ces phénomènes. Enfin, nous pouvons également faire référence aux travaux de S. Forrest [Forrest et Miller 90, Forrest 90], dans le domaine de "l'emergent computation", sur lesquelles nous reviendrons plus longuement au troisième paragraphe.

2. L'émergence en philosophie

2.1 Les concepts connexes

Comme nous le verrons, le concept d'émergence en philosophie s'oppose essentiellement à celui de "réduction" qui consiste à considérer qu'un phénomène peut toujours être expliqué par des processus sous-jacents. La température en est un exemple classique. Le terme température est employé quotidiennement pour désigner un phénomène, dont on sait maintenant, grâce à l'approche réductionniste, qu'il résulte de l'agitation thermique des molécules. Les concepts de "survenance", de "réalisation" et "d'épiphénomène" sont également à rapprocher de celui d'émergence.

Avant de voir ces différents concepts et afin de relier les domaines de discours entre eux, commençons par quelques notations et définitions :

Soient deux domaines de discours (ou théories puisqu'on utilise plutôt ce terme en philosophie) D et D' chacun muni d'un ensemble d'entités E et E' respectivement, d'un ensemble de propriétés P et P' et de lois L et L' . Parmi ces lois, il faut distinguer les lois causales C et C' permettant de décrire une dynamique et les lois générales G et G' permettant de décrire la composition ou la conservation du domaine considéré, telles que $L=C \cup G$ respectivement $L'=C' \cup G'$. Notons que D et D' ne se distinguent pas forcément par tous les éléments cités ci-dessus. Ainsi, on peut considérer les mêmes entités ($E=E'$) mais en parlant d'autres propriétés ($P \neq P'$). Plusieurs relations sont possibles entre ces deux domaines que nous exposerons en mentionnant s'ils s'opposent ou simplement différent du concept d'émergence. Il est possible qu'il n'y ait pas de relation établie (ou même établissable) entre deux domaines D et D' comme, par exemple, les théories ondulatoires et corpusculaires de la lumière.

a) Le concept de réduction

On distingue plusieurs types de réduction [Scaglione 96]:

- E' est *ontologiquement réductible* à E si toute entité de E' est une entité ou une composition d'entités de E (par exemple, un gène est un ensemble de segments d'ADN);
- P' est *réductibles par propriétés* à P si toute propriété de P' est une propriété ou une composition de propriétés de P (par exemple, la chaleur est l'énergie cinétique moyenne des molécules);
- C' est *causalement réductible* à C si toute loi causale de C' est une loi causale, ou une composition de lois causales de C (par exemple, les lois des gaz sont réductibles aux lois statistiques de la thermodynamique).

Si on a simultanément la réduction ontologique, la réduction par propriétés et la réduction causale alors D' est réductible à D, ou autrement dit D' n'est qu'une autre façon de parler de D [Nagel 61]

Un certain nombre de remarques s'imposent. Dans les définitions qui précèdent, nous ne faisons pas la différence entre distinction ontologique (gène en soi versus ensemble de segments d'ADN en soi) et distinction épistémologique (ce que l'on appelle gène versus ce que l'on appelle segments d'ADN indépendamment de leur existence en soi). En effet, supposer l'existence en soi des entités, propriétés, etc. dont on parle ne nous semble pas ajouter quoique ce soit à la discussion. La relation de réductibilité est asymétrique (D' réductible à D n'implique pas D réductible à D'). Cette asymétrie semble aller dans le sens d'une simplification par le remplacement non-arbitraire d'une structure composée par une seule entité, par exemple d'une structure de molécules par un objet. Le côté non-arbitraire vient de ce qu'il y a structure et pas seulement ensemble d'où l'importance des lois de composition considérées.

Pour situer l'émergence dans ce cadre, la notion d'émergence semble être venu du constat de la non-réductibilité de certains domaines à d'autres (par exemple, du mental au physique).

b) Le concept de survenance

Le concept de survenance ne s'applique qu'aux propriétés et plus précisément avec $E=E'$. Il dit en substance qu'une propriété p2 survient d'une propriété p1 si lorsque deux entités ont la propriété p1 alors elles ont aussi la propriété p2. Cette notion est plus qu'une simple covariance puisqu'elle suppose une dépendance de p2 sur p1 donc la relation de survenance est également asymétrique. La formulation donnée est potentiellement ambiguë. La levée de cette ambiguïté donne des variantes différentes :

- *survenance faible* : si deux entités ont la propriété p1 alors elles ont aussi la propriété p2, toutes choses étant égales par ailleurs.
- *survenance globale*: si deux entités dans des mondes identiques du point de vue de p1 ont la propriété p1 alors elles ont aussi la propriété p2.
- *survenance forte* : si deux entités dans deux mondes différents ont la propriété p1 alors elles ont aussi la propriété p2 (indépendance du contexte).

L'émergence pourrait être une survenance mais justement dans la littérature, l'émergence veut se poser comme quelque chose d'encore différent. Allons donc encore plus loin.

c) *Le concept de réalisation*

Le concept de réalisation s'applique à la fois aux propriétés et aux lois. En ce qui concerne les propriétés, on dira que la (ou les propriétés) p d'une entité e *réalise* la propriété q si et seulement si q possède les deux propriétés p et q et il existe entre p et q une connexion nécessaire *explicative*. Et il reste à préciser ce qui constitue une explication.

D'abord une explication fait forcément référence à une théorie si elle explique des transformations (et pas seulement des faits). Cette théorie possède des lois dont certaines sont causales et d'autres font des corrélations entre des propriétés. Certaines lois causales ne peuvent pas être explicatives car il ne s'agit pas toujours de comprendre pourquoi e a acquis la propriété q et de même pour des lois non causales (par exemple le couplage entre la conductivité électrique et la conductivité thermique n'explique rien). Par exemple, une explication liant la propriété p: "avoir une certaine structure atomique et cristalline" et q: "être transparent" est imaginable. Ce dernier exemple suggère que p doit être associée à la microstructure de e et q à la macro-structure.

Pour la réalisation des lois, la situation est moins claire. Si p réalise q et p' réalise q', quel lien faut-il établir entre les lois qui relient p à p' et les lois qui relient q à q' pour que l'on puisse dire que les lois sur p et p' réalisent une loi entre p et q. A noter que la réalisation de lois suppose d'une certaine façon que D et D' décrivent des niveaux successifs. Nous n'explorerons pas cette voie ici mais le fait que le cerveau "réalise" nos états mentaux peut-être exprimé par la réalisation de la loi causale reliant une croyance à une intention par les lois de changement d'états du cerveau.

La réalisation est-elle l'inverse de la réduction ? Il semble que non, à cause du dernier exemple. En effet, une structure atomique et cristalline donnée réalise la propriété de transparence mais il n'empêche que le phénomène de transparence ne s'observe pas au niveau atomique et est donc émergente de la microstructure atomique. Cela poserait la réalisation comme un concept très général qui relie deux domaines de discours D et D', que D' (où certains aspects de D') soient réductibles ou émergents de D. Qu'en est-il de la survenance ? En fait la réalisation sert à rendre explicites les conditions de survenance entre deux propriétés.

d) *Le concept d'épiphénomène*

Prenons la définition du "Petit Robert: "

Epiphénomène: 2. (fin XIXème, empr. angl.) *Philo.* Phénomène qui accompagne le phénomène essentiel sans être pour rien dans son apparition ou son développement.

Un exemple est celui de l'ombre de la main qui est un épiphénomène puisque sa présence ne change pas ce que l'on fait par ailleurs. La notion ne semble pas vraiment problématique contrairement aux notions qui précèdent, mais méritait de s'y arrêter quelques instants pour éviter toute confusion.

2.2 L'émergentisme britannique

Nous avons dit que le concept d'émergence se définissait essentiellement par opposition au concept de réduction. Pour le rendre opératoire, le problème qui se pose est de trouver une définition au minimum positive, au maximum constructive. Il faut également garder à l'esprit que ce concept peut éventuellement s'articuler différemment selon qu'il s'agit de l'émergence d'une entité (d'une structure), d'une propriété ou d'une loi.

Nous allons d'abord en tracer une perspective historique avant de faire le tour de quelques définitions.

La première apparition du terme "émergence" date de l'émergentisme britannique qui se situe au milieu d'un débat entre quatre courants d'idées :

- le *vitalisme substantiel* qui prétend qu'il existe une substance liée au vivant (entéléchie);
- la *théorie des composantes* qui prétend qu'il existe une composante liée au vivant mais n'est de ce fait qu'une variante du vitalisme;
- la *théorie mécaniste* pour laquelle nous ne sommes que des machines;
- et finalement la théorie de *l'émergentisme* (Lewes, S.Alexander, Broad, Stuart Mill: livre de Broad "the mind and its place in nature", 1923).

Cette dernière théorie se base sur les travaux de Stuart Mill qui distingue deux types de lois organisant la nature:

- le mode *homopathique* ou *résultant* que l'on peut expliquer par des lois causales ou par composition des causes;
- le mode *hétéropathique* ou *chimique* ou *émergent* qu'on ne peut pas expliquer par des lois causales comme l'acquisition des propriétés de l'eau à partir des propriétés de l'oxygène et de l'hydrogène respectivement.

Le débat tourne autour de l'existence des lois hétéropathiques qui pose le problème de la réductibilité des sciences spécifiques (chimie, biologie, etc.) à la physique.

L'argumentation des émergentistes tourne autour de la vision du monde en niveaux qui s'articulent les uns sur les autres, le niveau physique étant le plus fondamental, et autour de la question de l'existence des entités d'un niveau donné, émergentes du niveau directement inférieur.

Pour les émergentistes britanniques, les entités d'un certain niveau $n+1$ émergentes d'un niveau n existent si et seulement si elles ont un pouvoir causal et donc permettent une explication des phénomènes à leur niveau.

Si on trouve une cause entre le niveau n et $n+1$, on n'a pas émergence, l'un est réductible à l'autre. Pour qu'il y ait émergence, il faut trouver une causalité entre $n+1$ et n ou $n+1$ et $n+1$ (mais c'est alors réductible à $n+1 \rightarrow n$). S'il n'y a qu'une causalité entre n et $n+1$, c'est un épiphénomène (exemple de l'ombre de la main).

Dans cette argumentation, la nature et l'existence d'une causalité descendante est donc fondamentale. On peut distinguer deux types de causalité descendante (effet du niveau $n+1$ sur n) :

- une causalité macro-micro effective. Une possibilité de réalisation est l'argument téléologique : une chose x a réalisé une chose y donc y a causé x . Cet argument mélangeant cause efficiente et cause finale ne tient pas sauf dans les cas de causalité circulaire auquel cas toute cause efficiente devient une cause finale et réciproquement.
- la macro-structure a une causalité sur la micro-structure lorsque la macro-structure fait exister la micro-structure dans une perspective temporelle : par exemple, une organisation sociale (niveau macro) permet d'assurer l'existence des individus qui y participent (niveau micro) mais, ici, peut-on vraiment parler de causalité.

Notons que dans les deux cas nous avons une circularité.

Avant de continuer, introduisons encore la distinction entre l'émergence épistémologique qui stipulerait que tout peut être expliqué au niveau n , mais que l'on se crée un vocabulaire autour du niveau $n+1$ pour être capable d'en parler et l'émergence ontologique qui affirme une existence en soi des entités émergentes (ou un réduction en soi des entités considérées). Si on se reporte à l'introduction, il s'agit de savoir si le fait d'établir une relation de réduction entre D et D' nous autorise ou non à encore parler valablement de D' comme munie d'entités E' en soi. Toujours par rapport à notre formalisation deux remarques s'imposent :

- les domaines D , D' , etc. introduit dans l'émergentisme britannique forment d'une part une stricte hiérarchie et d'autre part couvrent des champs scientifiques complets (chimie, biologie, etc.);
- le concept d'émergence s'applique aux entités (E et E'), le problème étant de valider l'existence des entités de E' par l'existence de lois causales à leur niveau (C').

2.3 Définitions récentes de l'émergence

La plupart des tentatives modernes de définir l'émergence repose sur une critique de l'émergentisme britannique et notamment le côté non explicite :

- de la nature des relations entre "les parties" et "le tout" ;
- de la nature des propriétés que l'on prend ;
- de l'état des connaissances ou plus précisément dans quel cadre théorique on se situe.

Or le concept d'émergence semble profondément lié à ces aspects. Certaines définitions qui suivent prennent en compte ces critiques :

1/Hempel & Oppenheim [Hempel & Oppenheim 48]

L'occurrence d'une caractéristique W d'un objet w est émergente relativement à une théorie T , à une relation de partie PT , à une classe d'attributs G des parties, si cette occurrence ne peut pas être déduite des parties de W données par PT respectivement à tous les attributs G .

Cette définition a l'avantage de montrer que la caractérisation de l'émergence d'une propriété est liée d'une part à un objet et surtout à sa composition. Nous retrouvons donc w dans E' , PT nous donne les éléments C_i de E composant w , enfin nous avons G dans P et W dans P' . La théorie T n'est pas explicitement située mais se trouve à l'évidence dans D (donc est identique à L). C'est le fait que T ne permet d'induire W sur w qui justifie la construction d'un autre domaine de discours D' dans lequel W prend son sens. La définition qui suit rend plus précise la relation PT et la nature de la théorie T que l'on veut considérer.

2/ Cummins [Cummins 83]

Soit la micro-structure d'un objet x : $x = [C_1, C_2, \dots, C_n; R]$ telle que C_i sont des composantes et R leur organisation. Nous avons les définitions de posséder une propriété pour une microstructure :

x a nécessairement la propriété de F ssi [si $x = [C1, C2, \dots, Cn; R]$ alors $F(x)$] est une loi.

Pour expliquer que $[C1, C2, \dots, Cn; R]$ produit F (et pas seulement le constater), on a besoin d'une théorie des composants T_c qui étant donné F permet de déduire les $[C1, C2, \dots, Cn; R]$ ayant F. On définit alors la micro-réduction de la façon suivante :

F est *microréductible* à $[C1, C2, \dots, Cn; R]$ ssi $\exists T_c$ (la théorie des composants) permettant pour chaque loi relative à F de construire son image dans $[C1, C2, \dots, Cn; R]$

On en vient enfin à la définition de l'émergence :

F est une propriété *émergente* de la microstructure ssi $x = [C1, C2, \dots, Cn; R]$ possède F :

1. si tous les $x = [C1, C2, \dots, Cn; R]$ ont la propriété F
2. si F n'est pas microréductible

3/ Teller [Teller 92]

Une propriété est émergente si elle n'est pas réductible aux propriétés non relationnelles de ses parties.

Ainsi la propriété d'être le crayon le plus long dans une boîte de crayons est non-émergente dans cette définition alors qu'elle le serait si on ne précisait pas "non relationnelles". Nous avons ainsi une caractérisation plus précise des propriétés à considérer dans D. En ce qui concerne D', Teller précise par ailleurs que les propriétés fonctionnelles sont de toute façon émergentes. Une partie n'acquérant une fonction que dans un tout (à discuter plus tard), nous avons le cas de l'émergence d'une propriété d'une entité de D étant donné une structure dans laquelle elle s'insère.

4/ Mario Bunge [Bunge 77]

Soit P une propriété d'une chose complexe x différente de la propriété "être une composante de". Alors,

1. P est une propriété *résultante* ou *héréditaire* si P est une propriété appartenant à l'une des composantes du système.
2. Autrement dit, si aucune composante de x ne possède P, alors P est *émergente*, *collective* ou *gestaltiste*.

Il ajoute comme postulat que toute propriété émergente peut être expliquée à partir des propriétés de ses composantes et des couplages entre ces dernières.

5/ John R. Searle [Searle 95]

Citons ce que dit J.Searle : "Soit un système S, constitué d'éléments a, b, c... Par exemple S pourrait être une pierre, et les éléments les molécules. En général il y aura des caractéristiques de S qui ne sont pas, ou pas nécessairement, des caractéristiques de a, b, c... Par exemple, il se pourrait que S pèse cinq kilos, mais pas les molécules prises individuellement. Appelons ces caractéristiques les "caractéristiques du système". La forme et le poids sont des caractéristiques du

système. Certaines caractéristiques du système peuvent être déduites ou conçues ou calculées à partir des caractéristiques de a, b, c sur la simple base de leur arrangement ou de leur composition (et parfois des relations qu'elles entretiennent avec le reste de l'environnement) - par exemple la forme, le poids, la vitesse. Mais d'autres caractéristiques ne peuvent se concevoir à partir de la seule composition des éléments et des seules relations environnementales ; il faut les expliquer en termes des interactions causales qui se produisent entre les éléments. Appelons-les des "caractéristiques du système causalement émergentes". Solidité, liquidité et transparence en sont autant d'exemples.

D'après ces définitions, la conscience est une propriété émergente des systèmes... Cette conception de l'émergence causale, qu'on appellera "émergente 1", doit être distinguée d'une conception beaucoup plus aventureuse, qu'on appellera "émergente 2". Une caractéristique F est émergente 2 si F est émergente 1 et F a des pouvoirs causaux qui ne peuvent s'expliquer par les interactions causales de a, b, c... Si la conscience était émergente 2, la conscience pourrait alors causer des choses qui ne pourraient s'expliquer par le comportement causal des neurones. L'idée naïve qui est ici en cause est celle qui voudrait que la conscience se mette à jaillir sous l'effet du comportement des neurones dans le cerveau, mais sitôt après, qu'elle vive alors sa propre vie.

La conscience, selon J.Searle est émergente 1, mais pas émergente 2. Il précise d'ailleurs : "...je ne puis penser à rien qui soit émergente 2, et il paraît peu probable que nous puissions trouver des caractéristiques qui soient émergentes 2, parce que l'existence de telles caractéristiques serait une violation ne serait-ce que du principe le plus faible de la transitivité de la causalité."

6/ *Miriam Scaglione [Scaglione 96]*

Selon M.Scaglione [Scaglione 96], l'émergence est l'inverse (au sens mathématique) de la réalisation. La distinction vient de ce que la réalisation a un caractère descendant alors que l'émergence a un caractère ascendant. L'émergence est alors compatible avec la survenance qui en est une propriété. Une des conséquences importante est que l'émergence est donc explicable ce qui ne retire en rien son caractère émergent. Notons au passage qu'une bonne partie de la discussion ci-dessus est issue de [Scaglione 96].

2.4 Conclusion

De l'aperçu philosophique de l'émergence, il en ressort qu'on a souvent cherché, dans un premier temps, à caractériser un phénomène (ou une propriété) émergent (émergence épistémologique), pour se poser ensuite la question de sa vérité existentielle (émergence ontologique).

Il est à noter que les différentes définitions données pour caractériser un "Tout" émergent sont souvent négatives et relatives à un ensemble de parties constituant le "Tout" et/ou à une théorie T. Les principaux critères sur lesquels s'appuient ces définitions sont la non-causalité événementielle (parties -> Tout), la non-réductibilité du Tout aux parties et l'imprédictibilité du phénomène émergent, qui est souvent sujette à discussion.

La tendance générale est la critique qui est faite à la définition de l'émergence comme une irréductibilité, cette définition étant qualifiée d'irrationnelle. Une définition rationnelle serait celle de Bunge parce qu'elle ne fait pas référence à une théorie mais de ce fait limite terriblement la définition. Une autre est de relativiser la

notion d'émergence à la théorie considérée. Cela ne fait pas forcément de l'émergence une salle d'attente pour des jours meilleurs (une meilleure théorie), mais simplement une notion relative.

3. D'autres sphères d'études récentes de l'émergence

On peut remarquer que la notion du temps, indispensable à l'émergence d'un phénomène, est souvent absente ou implicite dans les définitions en philosophie. Par contre, dans des définitions plus proches de nos domaines "SMA", l'aspect dynamique est essentiel : les définitions portent alors sur le processus d'émergence et non pas sur les définitions des variables (propriétés) émergentes. Voyons quelques nouvelles définitions.

3.1 Calcul émergent

Une définition de Stéphanie Forrest [Forrest 90] de la notion de calcul émergent ("Emergent computation") est particulièrement intéressante car assez proche conceptuellement de ce que l'on souhaite formaliser en SMA. Elle y est définie comme :

- un ensemble d'entités en interaction : le processus ;
- un épiphénomène produit par ce processus : un état stable, un invariant ou une trace d'exécution ;
- une interprétation de cet épiphénomène comme un calcul ou le résultat d'un calcul.

Une première remarque concerne la distinction entre épiphénomène et émergence ; ce qui est émergent n'est pas l'état stable, l'invariant ou la trace mais son expression dans un vocabulaire distinct de celui dans lequel les processus sont programmés. Par exemple chez les fourmis, le phénomène émergent n'est pas la trace de phéromones mais son identification par l'observateur comme un chemin entre le nid et la source de nourriture.

Comme deuxième remarque, un épiphénomène n'est pas une émergence parce qu'il est causé par le processus mais n'interagit pas avec le processus. Automatiquement, on peut en faire une émergence justement si cette rétroaction a lieu. Il suffit pour cela que la trace (c'est la seule chose physiquement concrète, l'état stable ou l'invariant ne sont potentiellement perceptibles que si ils laissent une trace) interagisse avec le processus. A ce moment se produit quelque chose de nouveau qui n'est ni dans le processus (puisque'il faut la trace) ni dans la trace (puisque'il faut le processus) et qui, si il se stabilise, devient une émergence à la fois structurelle (la trace) et dynamique (le processus) ce qui illustre la dualité structure/dynamique. Ce type d'émergence est différent du premier dans le sens qu'il ne dépend pas d'un observateur.

3.2 Emergence en sciences cognitives

Yves-Marie Visetti [Visetti 96] dans le colloque de l'Association pour la Recherche Cognitive : "Emergence et explication", définit quant à lui trois types d'émergence :

1. émergence par le passage d'un point de vue micro à un point de vue macro ;
2. émergence par restructuration d'une explication d'un système suite à un événement ;

3. émergence par inscription d'un système A dans un système B en interaction avec A. Dans le cas où $A=B$, nous avons autopoïèse sinon on pourrait parler "d'hétéropoïèse".

Le premier cas est l'émergence de Stéphanie Forrest dans une acception qui serait donc statique et dépendante de l'observateur, le dernier cas est une extension extrême qui serait dynamique et indépendante de l'observateur. Entre deux, un cas intermédiaire dynamique et dépendant de l'observateur (puisque c'est lui qui doit restructurer sa compréhension du système). *A priori*, on peut jouer de n'importe quelle définition et même de toutes à la fois dans le même système.

Il reste cependant à préciser, dans le cas de l'observateur, ce que l'on entend par le fait que deux points de vue sont émergents l'un de l'autre. A une extrême, construire le point de vue macro comme une somme (ou autre composition aussi complexe soit elle) de certaines valeurs des entités micro n'est pas émergent. A l'autre extrême, l'énergie cinétique moyenne d'un ensemble de molécules ne l'est pas davantage mais le fait de l'appeler "température" et de lui associer une phénoménologie distincte de celle des molécules en fait une.

Pour Minsky, l'analyse poussée des phénomènes émergents "fait cependant généralement apparaître que ces phénomènes peuvent tout à fait être expliqués dès lors que l'on prend également en compte les interactions entre ces parties - ainsi que les particularités et lacunes des perceptions et des attentes de l'observateur" [Minsky 88]. C'est aussi l'exacte position de Bertalanffy lorsqu'il s'exprime sur les propriétés émergentes : "la connaissance de l'ensemble des parties contenues dans un système et celle des relations qui les lient permettra de déduire du comportement des parties, celui du système" [von Bertalanffy 93].

3.3 *Emergence en Économie/Gestion*

"L'ordre économique est une émergence, c'est la conséquence non intentionnelle et non voulue des actions d'un grand nombre de personnes mues par leurs seuls intérêts [Friedman 92]". En définissant ainsi l'ordre économique, M.Friedman nous éclaire sur la notion d'émergence dans laquelle nous serions tentés de qualifier les actions de locales. De plus, un certain nombre d'autres notions y sont associées : stabilité, absence d'intentionnalité, nouveauté, imprévisibilité, continuité, irréversibilité.

Tout d'abord l'idée d'une *relative stabilité*. F.von Hayek [ref?] considère pour sa part qu'il existe des "ordres sociaux émergents" et pour H. Mintzberg [Mintzberg 81] une stratégie émergente est un "ordre non intentionnel". En fait, pour être identifié, un phénomène, un comportement, un processus... qui émerge doit être suffisamment stable, d'où cette idée d'ordre, évoquant justement cette stabilité.

On retrouve également l'idée qu'il n'y a pas de direction centrale associée à l'idée d'émergence : elle *ne se pilote pas* (et se contrôle encore moins). Tout au plus on pourra tenter de prédire qu'il y aura émergence (sans pouvoir prédire ce qui va émerger, ni quand cela va émerger) ; ce sont les notions de *nouveauté* et d'*imprévisibilité*. Un phénomène, un comportement, un processus... qui émerge à un niveau global, résulte de l'interaction de comportements, de phénomènes, de processus locaux, "égoïstes et myopes" (par exemple chaque comportement dans son propre contexte et en référence à ses finalités propres).

Mais tout en conservant l'idée que l'émergence ne se pilote pas, on propose de passer d'un ordre social (émergent) spontané (Hayek) : "Human action but not human design" à "Human action for human design". Autrement dit il s'agit de restaurer

l'idée d'intentionnalité (téléologie). En m'exposant intentionnellement au "bruit", je crée des conditions pour qu'émergent des occurrences "non-programmées" (des occurrences de "possibles" non encore recensés). Par exemple le nomade (à la différence du sédentaire), par son comportement, crée les conditions de l'émergence de "possibles non encore recensés". Tout en conservant l'idée que l'émergence ne se pilote pas, on rajoute que l'on peut, intentionnellement, tenter de créer des conditions qui lui sont "favorables".

Enfin, la notion d'émergence est également caractérisée par les idées de *continuité* et d'*irréversibilité*. Cette notion doit, en effet, être entendue dans sa "temporalité", résultante de processus, phénomènes, comportements s'inscrivant dans le temps, et par conséquent comme ayant un caractère d'irréversibilité.

4. Vers une définition de l'émergence en SMA

A la lumière de ces différentes définitions, tant en philosophie, qu'en informatique, en économie/gestion ou encore en sciences cognitives, il nous semble essentiel de se donner une définition positive, temporelle (où le temps apparaîtrait explicitement) et constructive de l'émergence.

Une définition initiée par Ch. Lenay [Lenay 96] propose cette démarche positive et dynamique de l'émergence. Pour commencer, il est important de distinguer quelques caractéristiques des systèmes émergents impliquant le sujet et son environnement (milieu), et où l'émergence est portée par les interactions entre les deux.

La première caractéristique essentielle d'un système multi-agent est qu'aucun agent ne contrôle complètement la dynamique de la population. Les agents sont limités et il y a des différences du système global qu'ils ignorent. Il y a donc un extérieur relativement à chaque agent : un environnement (un milieu).

La seconde caractéristique est que, par définition, les agents agissent et donc modifient cet environnement. Mais, les agents ne peuvent percevoir et agir que localement dans cet environnement. Autrement dit, chaque agent interprète l'environnement suivant ses moyens limités (d'après les distinctions qu'il peut faire).

La troisième caractéristique est que l'extérieur de chaque agent contient d'autres agents. Les agents sont plusieurs dans un environnement commun (ils sont extérieurs les uns par rapport aux autres). Les interprétations de l'environnement par les divers agents sont possiblement différentes. Dans le cas des agents réactifs, l'environnement contient des objets et d'autres agents. Dans le cas des agents cognitifs, l'environnement peut aussi contenir des messages.

Ainsi, la dynamique du système procède d'une itération entre interprétation de leur environnement local par les agents, action des agents sur cet environnement, nouvelle interprétation de l'environnement modifié, nouvelles actions, etc.

Quand une telle dynamique (ou certaines de ses composantes) se stabilise on peut parler d'émergence d'une structure ou de fonctionnalité globale. Remarquons qu'à tout moment, c'est l'environnement possiblement modifié par l'ensemble des autres agents que chaque agent soumet à son interprétation. C'est là la condition pour que la dynamique populationnelle ne soit pas une simple juxtaposition de dynamiques indépendantes. Si tel était le cas, on ne pourrait parler que d'émergence dans un sens très faible et seulement pour un observateur extérieur. Mais dès lors que, via l'environnement, le tout rétro-agit sur les parties, il y a émergence au sens fort, émergence pour les agents dans la mesure où c'est l'état global émergent stable qui conditionne (ou sélectionne) les comportements individuels de chaque agent.

Dans cette définition, la dynamique de l'interaction est postulée comme condition de base pour l'émergence de phénomènes, structures ... Notons aussi l'importance du lien Tout-parties qui conditionne le degré de catégorisation de phénomènes émergents. Dans ce qui suit, nous tendons vers une définition plus opérationnelle caractérisant le Tout et les parties et surtout cette rétroaction Tout-parties. Cette définition s'inspire de la définition précédente et de celles de S. Forrest et M. Bunge et suppose :

- un système d'entités en interactions dont l'expression des états et de la dynamique se fait dans un vocabulaire ou une théorie D ;
- ce système produit un phénomène que ce soit un processus, un état stable, ou un invariant qui est forcément global puisque produit par le système ;
- l'observation de ce phénomène global soit par un observateur soit par le système lui-même.

Cette observation ne peut se faire qu'à travers une inscription du phénomène d'une part et une interprétation de cette inscription par l'observateur ou par le système d'autre part dans un vocabulaire ou une théorie D' distincte de D . Une théorie de l'émergence serait alors une théorie DO de l'inscription par un système d'entités en interactions et de son interprétation.

Les définitions qui précèdent l'émergence en philosophie permettent de clarifier quelle relation doit exister entre D et D' pour pouvoir vraiment parler d'émergence, à savoir que D réalise D' . Dans tous les cas, cette définition permet de tenir compte à la fois des définitions 1 et 3 de Visetti [Visetti 96]. Enfin, notons que cette définition distingue bien deux niveaux : un niveau micro (celui d'entités agissantes pouvant entrer en interaction) et un niveau macro (celui d'un ensemble d'entités dit collectif). Partant d'un ensemble d'entités, on considère une production-dans-sa-globalité (état stable) de ce collectif-dans-sa-globalité.

Un autre point soulevé par cette définition est le problème d'interprétation des inscriptions. Ce qui fournit deux sens possibles au phénomène émergent. Un premier sens faible où les inscriptions se réfèrent fondamentalement à un seul et même ordre de réalité appréhendée selon deux niveaux qu'il est commode, voire indispensable de distinguer. Le problème se résume alors à "une autre façon de parler des choses" plus simple ou plus compacte, la température résultant des agitations cinétiques en est un exemple. Ce qui correspond aussi à l'émergence au sens 1 de Visetti. Notons enfin que cette émergence peut être liée à l'ignorance de l'observateur, de son incapacité (éventuellement provisoire) à rendre compte, au fond, d'une compositionnalité sous-jacente. Sans assumer un dualisme trop radical, on peut considérer l'émergence au sens fort si l'inscription de la production globale ne relève pas du même ordre de réalité que l'inscription des productions individuelles.

Comment utiliser ces définitions ? ou comment appréhender l'émergence en SMA ? La démarche naturelle serait de l'aborder par rapport à une émergence observée par ailleurs. En effet, la démarche classique de modélisation et d'explication en émergence va de l'observation des phénomènes naturels jusqu'à leur reproduction avec des systèmes artificiels. Dans certains cas, la modélisation se restreint à une attitude interprétative des phénomènes observés sans pouvoir de validation des hypothèses avancées. C'est le cas pour certains comportements collectifs observés dans les sociétés d'insectes (altruisme, ...) ou sociétés humaines. Les modèles de la Vie Artificielle tentent de reproduire les hypothèses et les conditions d'émergence de certains phénomènes en simulation, ce qui permet en retour une meilleure compréhension de ces phénomènes (mais entraîne aussi de forts présupposés sur le sens du terme émergence). L'extension des résultats obtenus permet ensuite d'adopter

une attitude prédictive en créant les conditions d'émergence de phénomènes artificiels nouveaux en simulation ou en expérimentation (où ils existent d'autres types de contraintes technologiques). C'est le cas en robotique collective où la spécification et la combinaison (parfois aléatoire) de comportements de base d'un ensemble de robots, peuvent conduire à l'observation de comportements globaux émergents. C'est aussi le cas en programmation où c'est le seul moyen de régler le problème de la compositionnalité triviale : tout ce qui se fait en informatique est forcément la combinaison d'exécution d'instructions élémentaires. Mais parler d'informatique, c'est aller au delà des phénomènes physiques. L'approche émergentiste fournit une manière d'aller au delà. Le rapport entre émergence d'ailleurs et émergence en informatique passe par les inscriptions. Les productions seront différentes (niveau du substrat), mais elles conservent une organisation comme en témoignent leurs inscriptions.

Enfin, il est important de noter que ce qui va justifier la caractérisation d'une production globale (c'est-à-dire un comportement du système) comme émergente est non seulement l'adéquation à la définition, mais aussi sa subordination à l'existence même d'une émergence au sens fort.

5. Conclusion et perspectives

Il est fait appel à l'émergence à la fois lorsqu'il s'agit de rendre compte de phénomènes complexes et lorsqu'il s'agit de réaliser des systèmes capables de s'adapter à des environnements dynamiques et incertains. Dans les deux cas, le concept même d'émergence pose problème de par l'absence apparente de définitions constructives. Nous avons tenté dans ce papier de faire le tour de l'essentiel de ce qui a été dit sur l'émergence. Ceci nous a permis de dégager un essai de définition positive (et non pas par absence de quelque chose) dont nous espérons qu'elle débouchera sur une méthodologie concrète de description et de conception de systèmes complexes. Elle permet en tout cas d'argumenter qu'il peut exister une alternative émergentiste aux méthodes classiques de la résolution de problèmes.

L'alternative émergentiste repose d'une part sur un ensemble d'entités en interactions entre eux et avec l'environnement et d'autre part sur un mécanisme d'interprétation médié par un mécanisme d'inscription. De par son centre d'intérêt, à savoir des ensembles d'entités en interactions, les SMA constituent avec les réseaux neuromimétiques et le connexionisme en général, un moyen privilégié de mise en œuvre et d'étude de l'alternative émergentiste. En d'autres termes, les SMA ne monopolisent pas l'émergence dont on a vu qu'il est le sujet de réflexion aussi bien en Vie Artificielle que dans les sciences de la nature. Ce dernier point suggère qu'on peut envisager l'émergence comme un nouveau paradigme, transversal à plusieurs branches de l'informatique, dès lors que le concept d'émergence cesse d'être la salle d'attente de la compréhension humaine pour devenir un concept constructif.

En ce qui concerne l'observation, nous avons vu qu'il faut un observateur du phénomène global pour qu'il y ait émergence. Ce point soulève une ambiguïté car l'observateur peut rester extérieur au système auquel cas on lui demande un effort d'interprétation dans une direction qui n'est pas intrinsèquement contenue dans la dynamique du système ou l'observateur peut lui-même être partie prenante de la dynamique d'ensemble de par ses possibilités d'interaction avec le système auquel cas il est le moteur même de l'émergence. Dans ce second cas, l'interaction de l'utilisateur/observateur peut faire émerger plus que ce que l'utilisateur ou le système ne pourrait faire isolément.

L'informatique exige déjà de l'utilisateur qu'il voit, au delà des seules manipulations physiques de l'ordinateur, en termes des tâches qu'il y accomplit. De la même façon, l'émergence en informatique exige de l'observateur/utilisateur qu'il voit au delà des simples (= locaux ou micro) phénomènes d'interaction pour y voir le phénomène global que ces interactions réalisent. Cette explicitation du phénomène d'interprétation dans les réalisations informatiques (et de leur acceptabilité!) n'ouvre-t-il pas des portes vers une meilleure compréhension de la coopération homme-machine? Ceci ouvre en tout cas une nouvelle perspective en plus de celles consistant à développer des outils pour valider et exploiter notre proposition de concept d'émergence dans des réalisations concrètes.

6. Bibliographie

- [AMY 92] B. AMY, "Emergence et Immersion : les adrets et les ubacs de l'organisation", Actes des journées : Emergence dans les modèles de la cognition, ENST Paris, 15-16 avril 1992.
- [AVENIER 92] M-J. AVENIER, "Le management stratégique revisité : La problématique de l'éco-management" N.R. GRASCE n°92-16.
- [AVENIER 94] M-J. AVENIER, "L'ingénierie d'actions stratégiques en milieu complexe : Repères" N.R. GRASCE n°94-11.
- [AVENIER 96] M-J. AVENIER, "La stratégie tâtonnante" : des interactions récursives entre vision et action stratégiques ", N.R. 96-01, GRASCE.
- [BIRNER 96] J. BIRNER, "Mind, Market and Society, Network structures in the work of F. A. Hayek", working paper, 1996.
- [BONABEAU et al 95] E. BONABEAU, J.L. DESSALLES, A. GRUMBACH, "Characterizing emergent phenomena (1) and (2): A critical review", in Revue internationale de systémique, vol. 9, N°3, pp 327-346, et pp 347-371.
- [BONABEAU et THERAULAZ 94] E. BONABEAU, G. THERAULAZ (Eds.), "Intelligence collective", Ed. Hermes, 1994.
- [BOURGINE et VARELA 92] P.BOURGINE, F.VARELA, "Toward a practice of autonomous systems". Ed. F.varela, P.Bourguine, MIT Press, 1992.
- [BROOKS 89a] R.A. BROOKS, "A Robot that Walks: Emergent Behaviors From a Carefully Evolved Network", Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, A.I Memo. 1091, 1989.
- [BROOKS 89b] R.A.BROOKS, A.M.FLYNN, "Fast,Cheap and Out of Control" ref ? 1989.
- [BROOKS 91] R.A.BROOKS, "Intelligence Without Reason" IJCAI'91, 1991.
- [BUNGE 77] M. BUNGE, "Emergence and the mind", in Neuroscience, 2:501-509, 1977.
- [CAMPS et GLEIZES 96] V. CAMPS, M.P. GLEIZES, "Attitudes coopératives individuelles pour une capacité d'adaptation collective", journées françaises sur les systèmes multi-agents, JFIADSMA, Avril 1996, Sète, France, Pages 153-166.
- [CARIANI 90] P. CARIANI, "Emergence and Artificial Life". Artificial Life II; pp. 775-797, Ed. C. Langton, C.Taylor, J. Dooyne Farmer, S. Rasmussen, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [CARIANI 91] P. CARIANI, "Adaptivity and emergence in organisms and devices", in World Futures, vol. 31, pp. 49-70, Gordon & Breach science Publishers, 1991.
- [CUMMINS 83] R. CUMMINS, "The nature of Psychological Explanation", MIT Press, 1983.
- [DEMAZEAU 93] Y. DEMAZEAU, "La Plate-forme PACO et ses Applications", 2^{èmes} Journée Nationale du PRC-IA sur les Systèmes Multi-Agents, PRC-IA, Montpellier, France, décembre 1993.
- [DENEUBOURG et al 91a] J.L. DENEUBOURG, S. GOSS, N. FRANKS, A. SENDOVA-FRANKS, C. DETRAIN, L. CHRETIEN, "The Dynamics of Collective Sorting : Robot-Like Ants and Ant-Like Robots". From Animals to Animats (SAB'91); pp. 356-363, Ed. J.E. Meyer, S.W. Wilson, MIT Press, 1991.

- [DENEUBOURG et al 91b] J.L. DENEUBOURG, G. THERAULAZ, R. BECKERS, "Task Differentiation in Polistes wasp colonies: a model for self-organizing groups of robots". From Animals to Animats (SAB'91); pp. 346-355, Ed. J.E. Meyer, S.W. Wilson, MIT Press, 1991.
- [DENEUBOURG et al 92] J.L. DENEUBOURG, G. THERAULAZ, R. BECKERS, "Swarm-Made Architectures". Toward a practice of autonomous systems; pp. 123-133, Ed. F.varela, P.Bourgine, MIT Press, 1992.
- [DROGOUL et al 92a] A. DROGOUL, B. CORBARA & D. FRESNEAU, "Applying EthoModelling to social organization in ants". Biology and Evolution of Social Insects, pp. 375-383, Billen Ed., Leuven University Press, Belgium, 1992.
- [DROGOUL et al 92b] A. DROGOUL, J. FERBER, B. CORBARA, D. FRESNEAU, "A Behavioral Simulation Model for the Study of Emergent Social Structures". Toward a practice of autonomous systems; pp. 161-170, Ed. F.varela, P.Bourgine, MIT Press, 1992.
- [DROGOUL et FERBER 91] A. DROGOUL, J. FERBER, "A Behavioral Simulation Model for the Study of Emergent Social Structures", European Conference on Artificial Life, Paris, 1991.
- [DROGOUL et FERBER 94] A. DROGOUL, 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 and J. Doran eds, North-Holland, 1994.
- [DROGOUL 93a] A. DROGOUL, "When Ants Play Chess (Or Can Strategies Emerge from Tactical Behaviours?)", in "from Reaction to Cognition", : 5th European Workshop on Modelling an Agent in a Multi-Agent World - MAAMAW'93, C. Castelfranchi and J-P. Müller eds, Springer Verlag, 1996.
- [DROGOUL 93b] A. DROGOUL, "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 de Paris VI, Paris, Novembre 1993.
- [DUPUY 92] J-P DUPUY, "Introduction aux sciences sociales; Logique des phénomènes collectifs", Edition Ellipse, 1992.
- [FERBER 95] J. FERBER, "Les systèmes multi-agents", InterEditions, 1995.
- [FERRAND et al 97] N. FERRAND, Y. DEMAZEAU, C. BAEIJS, "Systèmes multi-agents réactifs et résolution de problèmes spatialisés", Revue d'Intelligence Artificielle (à paraître 1997).
- [FLYNN et BROOKS 89] A.M. FLYNN, R.A. BROOKS, "Battling Reality". 1989.
- [FOISEL et al 96] R. FOISEL, V. CHEVRIER, J.P. HATON, "De l'organisation d'une société à sa réorganisation", Journée thématique du PRC-IA sur les systèmes multi-agents, Toulouse, Février 1996, pp 121-128.
- [FORREST et MILLER 90] S. FORREST, J.H. MILLER, "Emergent behavior in classifier systems", in "emergent computation", MIT Press, Cambridge, MA, 1990
- [FORREST 90] S. FORREST, "emergent computation: Self-organizing, Collective, and Cooperative Phenomena in Natural and Artificial Computing Networks", introduction to the proceedings of the ninth annual CNLS Conference, in "emergent computation", MIT Press, Cambridge, MA, 1990, pp 1-11.
- [FRIEDMAN 92] M. FRIEDMAN, "Free to choose", 1981, cité par J-P Dupuy, in "Introduction aux sciences sociales; Logique des phénomènes collectifs", Edition Ellipse, 1992, p199.
- [GRUMBACH 96] A. GRUMBACH, Emergence et niveaux d'organisation : un problème d'observateur, in Journées thématiques de l'ARC (émergence et explication), 1996.
- [HEMPEL & OPPENHEIM 48] C.G. HEMPEL & P. OPPENHEIM, "Logic of explanation", Philosophy of science, 15:135-175 - 1948
- [HOFSTADTER 79] D. HOFSTADTER, "Gödel, Escher, Bach: An eternal golden braid", basic books, 1979
- [IKEGAMI et KANEKO 90] T. IKEGAMI, K. KANEKO, "Computer symbiosis - emergence of symbiotic behavior through evolution", in "emergent computation", MIT Press, Cambridge, MA, 1990, pp 235-243.

- [KANADA et HIROKAWA 94] Y. KANADA, M. HIROKAWA, "Stochastic Problem Solving by Local Computation based on Self-organization Paradigm", 27th Hawaii Int. Conf. on System Sciences, 1994, pp. 82-91.
- [KAMPIS 91a] G. KAMPIS, "self-modifying systems in Biology and Cognitive Science", Oxford, Pergamon Press, 1991.
- [KAMPIS 91b] G. KAMPIS, "Emergent computations, life and cognition", in World Futures, Vol.31, Gordon and Breach Science Publishers S.A. 1991, pp. 33-48.
- [LACROUX 96] F. LACROUX, "Contribution à une théorie de la planification adaptative : La stratégie procédurale", thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille III, 1996.
- [LABBANI et al 96] O. LABBANI, J.P. MULLER, A. BOURJAU, "Describing collective behaviours" in Workshop ICMAS, 09-13 Dec., Kyoto, Japan, 1996.
- [LE STRUGEON et al 96] E. LE STRUGEON, G. AGIMONT, R. MANDIAU, P. MILLOT, "Un exemple d'organisation évolutive parmi les robots fourrageurs", journées françaises sur les systèmes multi-agents, JFIADSMA, Avril 1996, Sète, France, pages 167-176.
- [LANGTON 90a] C.G. LANGTON, "Computation at the edge of chaos: phase transitions and emergent computation", in "emergent computation", MIT Press, Cambridge, MA, 1990, pp 12-37.
- [LANGTON 90b] C.G. LANGTON, "Introduction to Artificial Life II". Artificial Life II, Proceedings of the Workshop on Artificial Life Held Feb., 1990 in Santa Fe, New Mexico, Ed. C. Langton, C.Taylor, J. Doynne Farmer, S. Rasmussen, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [LENAY 96] C. LENAY, "Coopération et intentionnalité", journées françaises sur les systèmes multi-agents, JFIADSMA, Avril 1996, Sète, France, Pages 265-272.
- [LIU et SYCARA 93] J. LIU, K. SYCARA, "Emergent Constraint Satisfaction Through Multi-Agent Coordinated Interaction", in "from Reaction to Cognition", : 5th European Workshop on Modelling an Agent in a Multi-Agent World - MAAMAW'93, C. Castelfranchi and J-P. Müller eds, Springer Verlag, 1996.
- [MAGNIN 96] L. MAGNIN, "Modélisation et simulation de l'environnement dans les systèmes multi-agents. Application aux robots footballeurs", Thèse de l'université Paris VI, 1996.
- [MARCELPOIL et al 94] R. MARCELPOIL, E. BEAUREPAIRE, S. PESTY, "La sociologie cellulaire : modéliser et simuler une "société cellulaire" pour étudier le vivant". *Intellectica*, pp. 53-72, n°19, 1994/2.
- [MARCENAC 96] P. MARCENAC, "Emergence of Behaviors in Natural Phenomena Agent-Simulation", *Complex Systems* 96, From local interactions to global phenomena, IOS-Press, R. Stocker, H. Jelinek, B. Durnota & T. Bossomaier eds, Albury, Australie, 1996, pp 284-289.
- [MARCIA 96] GROUPE MARCIA, "Auto-organisation:=évolution de structure(s)", Journée thématique du PRC-IA sur les systèmes multi-agents, Toulouse, Février 1996, Pages 139-152.
- [MARTINET 90] A-C MARTINET (Ed) , "Epistémologies et Sciences de Gestion", *Economica*, 1990.
- [MARTINET 93] A-C MARTINET, "Les paradigmes stratégiques : l'éternel retour ?", *papier de Recherche* n°28, 1993.
- [MATARIC 92a] M. MATARIC, "Minimizing complexity in controlling a mobile robot population", in Proc. of the 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nice, France, May 1992.
- [MATARIC 92b] M.J. MATARIC, "Designing Emergent Behaviors: From Local Interactions to Collective Intelligence". *From Animals to Animats 2 (SAB'92)*, MIT Press, 1992.
- [MEMMI 96] D. MEMMI, "Emergence et niveaux d'explication", in Journées thématiques de l'ARC (émergence et explication), 1996.
- [MEYER et GUILLOT 91] J.A. MEYER, A. GUILLOT, *Simulation of Adaptive Behavior in Animats: Review and Prospect. From Animals to Animats (SAB'91)*; pp.2-14, Ed. J.E. Meyer, S.W. Wilson, MIT Press, 1991.

- [MITCHELL et HOFSTADTER 90] M. MITCHELL, D.R. HOFSTADTER, "The emergence of understanding in a computer model of concepts and analogy-making", in "emergent computation", MIT Press, Cambridge, MA, 1990, pp 322-334.
- [MÜLLER et PECCHIARI 96a] J.P. MÜLLER, P. PECCHIARI, "Un modèle de systèmes d'agents autonomes situés : application à la déduction automatique", dans AI distribuée et systèmes multi-agents, JFIADSMA'96, coordinated by J.P. Müller and J. Quinqueton, Ed. Hermes, 1996.
- [MÜLLER et PECCHIARI 96b] J.P. MÜLLER, P. PECCHIARI, "Un modèle de systèmes d'agents autonomes situés : application to automated deduction", dans Proceedings ICMAS'96, Kyoto, décembre 1996.
- [MINTZBERG 81] H. MINTZBERG, "Structure et dynamique des organisations", Les Editions d'Organisation, 1981.
- [MINSKY 88] MARVIN MINSKY - La société de l'esprit - Ed. Interditions - 1988
- [NAGAO et al 93] K. NAGAO, K. HASIDA, T. MIYATA, "Emergent Planning: A Computational Architecture for Situated Behaviour", in "from Reaction to Cognition", : 5th European Workshop on Modelling an Agent in a Multi-Agent World - MAAMAW'93, C. Castelfranchi and J-P. Müller eds, Springer Verlag, 1996.
- [NAGUEL 61] E. NAGEL, "The structure of Sciences", Ed. Harcourt Brace World, New York, 1961.
- [PIQUEMAL et GLIZE 96] C. PIQUEMAL-BALUARD, P. GLIZE, "Des aptitudes non cognitivistes d'agents pour l'auto-organisation", Journée thématique du PRC-IA sur les systèmes multi-agents, Toulouse, Février 1996, pp 129-138.
- [SCAGLIONE 96] M. SCAGLIONE, "L'intentionnalité dans les systèmes artificiels. Emergence et réalisation: deux côtés de la même pièce", Thèse de l'Université de Neuchâtel, Suisse, 1996
- [SEARLE 95] J.R. SEARLE, La redécouverte de l'esprit, Gallimard (éd.), 1995.
- [STEELS 90] L. STEELS, Cooperation between distributed agents through self-organisation, in Decentralized A.I., Ed. by Y. Demazeau and J.P. Muller, Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), 1990.
- [STEELS 91] L. STEELS, Towards a Theory of Emergent Functionality. From Animals to Animats (SAB'91), Ed. J.E. Meyer, S.W. Wilson, MIT Press, 1991, pp. 451-461.
- [TAYLOR 90] C.E. TAYLOR, "Fleshing Out" Artificial Life II. Artificial Life II; pp. 25-38, Ed. C. Langton, C. Taylor, J. Doyne Farmer, S. Rasmussen, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [TAYLOR 91] C. TAYLOR, "Fleshing out Artificial Life II", in Artificial Life II, C. Langton, C. Taylor, D. Farmer, & S. Rasmussen eds, Addison Wesley, 1991.
- [TELLER 92] P. TELLER, "A contemporary look at Emergence", dans A. Beckermann, H. Flohr et J. Kim, "Emergence or reduction?" Walter de Gruyter 1992, pp. 139-153.
- [VISETTI 96] Y.M. VISETTI, "Emergence et hétérogénéité : le problème des passages", in Journées thématiques de l'ARC (émergence et explication), 1996.
- [VON BERTALANFFY 93] LUDWIG VON BERTALANFFY - Théorie générale des systèmes - Editions Dunod - 1993
- [WILSON 90] S.W. WILSON, "Perceptron redux: emergence of structure", in "emergent computation", MIT Press, Cambridge, MA, 1990, pp 249-256.