L'EMERGENCE

IRIT/2003-12-R

Jean-Pierre GEORGÉ

Résumé. L'évolution rapide et constante des matériels informatiques, des logiciels et des réseaux de communication nécessite des approches nouvelles pour la conception de systèmes informatiques. Les futurs systèmes qui en résultent doivent permettre d'augmenter la prise en compte de la complexité, être plus robustes et plus autonomes. Il semble évident que pour répondre à ces futurs besoins, les techniques informatiques actuelles sont inadéquates. En prenant comme sources d'inspiration les systèmes naturels, nous proposons l'émergence comme nouvelle voie à explorer pour la conception de systèmes complexes. C'est pourquoi nous pensons que de nombreux travaux de recherche devraient s'orienter sur les théories de l'émergence. Mais pour cela, il est nécessaire tout d'abord de bien comprendre ce phénomène qui reste difficile à appréhender malgré les nombreuses disciplines s'y étant intéressé. Après une brève réflexion sur les besoins en informatique et les sources d'inspirations possibles, je présente un état de l'art de l'émergence à partir d'un historique et de définitions tirées de la littérature, de caractéristiques du phénomène, de son utilisation en informatique, des domaines scientifiques connexes et de son utilité. Je finis par présenter quelques exemples significatifs pour guider la réflexion.

1. Introduction 3
1.1. Les besoins futurs en informatique 3
1.2. Des sources d'inspiration 4
1.3. Conclusion 5
2. Historique et définition de l'émergence 6
2.1. Historique 6
2.2. Définition 8
2.2.1. La non-linéarité 9
2.2.2. Proche/Loin de l'équilibre (multi- non- ou à partir de l'équilibre) 9
2.2.3. L'auto-organisation 10
2.2.4. Les attracteurs 10
2.2.5. La dynamique 10
3. L'émergence en informatique 10
4. Les domaines scientifiques connexes 11
5. Nécessité/utilité du concept d'émergence 12
5.1. L'émergence pour la compréhension 12
5.2. Utilisation de l'émergence au sein de systèmes artificiels 12
6. Exemples de systèmes émergents 14
6.1. Systèmes physiques : le système de Bénard 14
6.2. Systèmes artificiels : les Automates Cellulaires et le Jeu de la Vie (Game of Life) 15
6.3. Insectes sociaux : l'expérience du double pont et des fourmis 16
6.4. Phénomènes sociaux : la synchronisation des applaudissements 16
6.5. L'eau 17
6.6. Le jeu d'échec 17
6.7. La conscience humaine 18

L'EMERGENCE

1. Introduction

Depuis sa naissance dans les années cinquante, l'informatique est essentiellement basée sur des théories formelles issues des Mathématiques ou de la Logique. Si le développement de logiciels en utilisant ce type d'approche a rencontré de nombreux succès, nombre de personnes s'interrogent sur son devenir et sa pertinence pour pouvoir résoudre les problèmes informatiques auxquels cette discipline va devoir faire face dans les prochaines années.

Aussi, de nouvelles approches, techniques et théories, doivent être recherchées dès aujourd'hui afin de pouvoir répondre aux besoins logiciels de demain. De nombreux chercheurs explorent de nouvelles frontières souvent inédites et assez éloignées des disciplines habituellement abordées par les informaticiens. Nous avons choisi de nous intéresser à celle qui nous semble la plus encourageante : l'émergence.

La suite de l'introduction présente les exigences de l'informatique de demain et les systèmes naturels dans lesquelles il est possible de puiser de nouvelles techniques pour réaliser des systèmes complexes, robustes et autonomes. Elle conclut que la nature même de ces systèmes naturels est l'émergence. Celle-ci constitue une nouvelle voie pour répondre aux exigences futures. Dans la partie 2, le concept d'émergence, à travers un historique et des définitions, est explicité en profondeur. La manière de l'exploiter dans le domaine de l'informatique nécessite, à mon sens, un cadre rigoureux qui est donné dans la partie 3. La partie 4 présente les domaines scientifiques connexes à l'émergence et montre que ce n'est pas une étude isolé, autant pas les domaines qui lui ont donné naissance, que par les domaines qui font face à des préoccupations similaires. Dans la partie 5, nous exposons l'intérêt d'utiliser le concept d'émergence et comment les scientifiques l'utilisent, pour la compréhension de systèmes complexes d'une part, et pour l'élaboration de systèmes artificiels d'autre part. Enfin, la partie 6 illustre l'émergence par des exemples variés de la nature (biologie, physique) et artificiels, afin d'enrichir la réflexion.

1.1. Les besoins futurs en informatique

Depuis quelques années, l'utilisation de l'outil informatique s'est développée de manière spectaculaire et les approches classiques de conception d'applications se heurtent à de nombreuses difficultés. Les systèmes d'exploitation sont un bon exemple de logiciels extrêmement complexes qui ne sont jamais exempts de problèmes. L'approche généralement utilisée, par décomposition en modules, se révèle impuissante à garantir une absence de problème car les phases de conception tendent à devenir trop complexes pour les développeurs à cause du grand nombre de cas à traiter. D'autre part, l'utilisation désormais massive et incontournable des réseaux contribue à accroître les problèmes de conception, de stabilité et de maintenance des applications actuelles.

Cet état de fait intéresse nombre d'industriels dont le géant du logiciel IBM qui écrit : "Even if we could somehow come up with enough skilled people, the complexity is growing beyond human ability to manage it. As computing evolves, the overlapping connections, dependencies, and interacting applications call for administrative decision-making and responses faster than any human can deliver. Pinpointing root causes of failures becomes more difficult, while finding ways of increasing system efficiency generates problems with more variables than any human can hope to solve. Without new approaches, things will only get worse. " [Horn 01]. Selon IBM, la réponse est un challenge scientifique qu'ils nomment "autonomic computing" dont l'objectif est de concevoir et de construire des systèmes informatiques capables de s'exécuter seul, d'ajuster leur comportement face à des circonstances variées et de préparer leurs ressources pour gérer au mieux leur charge de travail.

Mark Weiser, du Xerox Parc, s'intéresse à un autre type de problématique. En remarquant que certaines technologies aussi simples que l'écriture ou l'électricité sont si communes que personne n'y prête plus attention, il introduit la notion d' "informatique omniprésente" ("Ubiquitous Computing " ou "informatique diffuse" [Drogoul 01]) comme devenir de l'informatique : "*The "UC" era will have lots of computers sharing each of us. Some of these computers will be the hundreds we may access in the course of a few minutes of Internet browsing. Others will be imbedded in walls, chairs, clothing, light switches, cars - in everything. UC is fundamentally characterized by the connection of things in the world with computation. This will take place at a many scales, including the microscopic*" [Weiser 96].

Les futurs systèmes à développer sont donc caractérisées par :

- Un grand nombre d'artefacts (logiciels, objets intelligents) en interaction.
- Une nombre variable d'artefacts en cours de fonctionnement (système ouvert).
- Un contrôle centralisé impossible à mettre en œuvre.
- Un environnement évolutif.
- Une tâche globale à réaliser.

Le défi est donc de trouver de nouvelles approches pour concevoir de nouveaux systèmes informatiques et pour mettre en œuvre ces nouvelles applications sans se heurter aux difficultés que l'on rencontre déjà telles que la difficulté de prendre en compte une complexité croissante, la réalisation de systèmes robustes et autonomes. Pour découvrir une telle approche, il nous à sembler opportun de regarder des systèmes naturels, physiques, sociologiques afin de comprendre les mécanismes et processus qui leur permettent de fonctionner.

1.2. Des sources d'inspiration

En Physique et Chimie, les interactions entre des éléments simples donnent naissance à des structures complexes dotées de propriétés totalement nouvelles.

Par exemple, l'eau composée d'atomes d'oxygène et d'hydrogènes peut être considérée comme un phénomène émergent. La Thermodynamique est un exemple frappant de cet état de fait : alors que les molécules et leurs interactions sont parfaitement connues, les modèles des fluides ou liquides sont limités à des conditions fortement contraintes. L'utilisation des processus physiques ou chimiques à l'échelle moléculaire ou atomique pour développer des algorithmes peut permettre d'utiliser ce passage d'un micro niveau connu à un macro niveau aux fonctionnalités beaucoup plus complexes.

En Biologie, de nombreux systèmes naturels composés d'individus autonomes exhibent des aptitudes à effectuer des tâches qualifiées de complexes sans contrôle global. De plus, ils peuvent s'adapter à leur milieu soit pour y survivre, soit pour améliorer le fonctionnement du collectif. C'est le cas des colonies d'insectes sociaux [Camazine 02] tels que les termites, fourmis [Bonabeau 97], ou araignées [Bourjot 99] qui font effectivement preuve de remarquables capacités pour effectuer des tâches telles que : la construction de nids complexes, la construction de pont, la recherche efficace de ressources, la capture de proies… L'étude des déplacements collectifs de vols d'oiseaux migrateurs ou de bancs de poissons exhibe également le fait que la tâche collective est le résultat des interactions des individus autonomes. Le fonctionnement du système immunitaire est lui aussi représentatif du fonctionnement d'un système complexe composé d'un ensemble d'agents autonomes.

Des phénomènes non supervisés et qui résultent de l'activité d'un grand nombre d'individus s'observent aussi dans les activités humaines, tels la synchronisation des applaudissements d'une foule ou la gestion des embouteillages. Mais s'il est un phénomène bien plus surprenant chez l'homme, c'est bien celui de l'apparition de la conscience. « La conscience est une propriété du cerveau de niveau supérieur ou émergente au sens tout à fait banal de "niveau supérieur" ou d'"émergent" où l'on dit que la solidité est une propriété émergente de niveau supérieur de molécules d'H_2O lorsqu'elles sont dans une structure en treillis (glace), et que la liquidité est de même une propriété émergente de niveau supérieur de molécules de H_2O lorsque, pour exprimer grossièrement les choses, elles roulent les unes sur les autres (eau) » [Searle 95].

1.3. Conclusion

Parmi tous ces systèmes étudiés, il est un facteur commun : la dimension émergente des phénomènes. Il parait donc légitime d'étudier ce phénomène afin de pouvoir en comprendre le fonctionnement ou au moins être capable de l'utiliser pour la conception de systèmes artificiels. Ceci pourrait permettre de construire des systèmes plus complexes, robustes, autonomes et adaptatifs dans les situations que nous avons présentées dans la partie 1.1. Ainsi, des phénomènes désirables similaires pourront survenir dans l'univers des systèmes artificiels. A contrario, si nous n'y prenons garde, ces phénomènes seront non seulement inattendus mais aussi indésirables. Pour y faire face, une orientation selon nous, serait que la communauté scientifique étudie et élabore de nouvelles théories portant sur

l'émergence. Nous pouvons résumer en quatre conditions l'existence d'une théorie de l'émergence :

- Se situer dans le domaine de la théorie des systèmes,
- Porter sur les parties du système,
- Ne dépendre ni de la finalité du système ni de son environnement,
- Etre indépendante du support matériel sur lequel elle pourrait s'incarner (biologique, technologique, …).

On peut noter que des travaux sont déjà en cours depuis des années mais restent très localisés. Par exemple, le Santa Fee Institute (www.santafe.edu) a acquis une renommée internationale grâce a ses travaux sur la complexité, les systèmes complexes adaptatifs, et donc l'émergence. Ce sont également les préoccupations de Exystence (www.complexityscience.org), le réseau d'excellence européen sur les systèmes complexes. Plus récent (mars 2002), ce réseau veut permettre la collaboration entre chercheurs européens intéressés par les systèmes complexes, des concepts fondamentaux aux applications.

Mais avant toute chose, il est nécessaire de bien comprendre le concept d'émergence si l'on veut se baser dessus pour élaborer des théories afin, finalement, de construire des systèmes artificiels à la hauteur de nos ambitions. Trop souvent le concept d'émergence a été utilisé de façon sinon abusive, en tout cas dans un contexte scientifique flou rendant sa compréhension et son utilisation difficile. Nous allons tenter de donner un cadre rigoureux sur lequel appuyer nos travaux.

2. Historique et définition de l'émergence

2.1. Historique

Comme le résument Ali et Zimmer dans "The question concerning Emergence" [Ali 97], l'origine de l'émergence pourrait bien être le postulat datant de la Grèce antique : "le tout est plus que la somme de ses parties". On retrouve des traces du concept d'émergence et d'auto-organisation dans des écrits de Thalès et Anaximandre.

Dans le même ordre d'idées, Aristote parle du "tout avant les parties". Il réfère à l'explication admise de la précédence de l'entité représentant le tout par rapport aux parties sur lesquelles le tout est construit. Il se sert de cette notion pour expliquer certains phénomènes que l'on n'arrive pas à décomposer.

On retrouve bien plus tard la même idée dans les écrits de J. W. von Goethe (1749-1832). Ce poète, philosophe et scientifique élabore la théorie de la "Gestalt" (silhouette, forme) qui fait référence à une entité naturelle qui est le point final d'un développement à partir d'un chaos primordial.

Cependant le "tout avant les parties" de même que la "Gestalt" supposent qu'une entité cohérente est prédonnée alors que l'émergence est une construction dynamique apparaissant au cours du temps. Ainsi, il faut attendre le milieu du XIXe siècle pour voir apparaître un mouvement de pensée autour du concept de l'émergence [McLaughlin 80]. Ce mouvement sera plus tard appelé **Proto-émergentisme** et se poursuivra jusque dans les années 30**.** Ses débuts sont surtout caractérisés par la distinction que fait G. H. Lewes entre résultant et émergent [Lewes 75]. Ce philosophe anglais dont les travaux sont basés sur ceux de J. S. Mill, explique en 1875 que pour le résultant la séquence d'étapes qui produisent un phénomène est traçable, alors que pour l'émergent nous ne pouvons pas tracer les étapes du processus. Ainsi nous ne pouvons pas voir dans le produit le mode d'opération de chaque facteur. L'émergence ne peut pas être réduite ni à la somme ni à la différence des forces co-opérantes [Kim 00].

De nombreux philosophes, mathématiciens, biologistes et physiciens participent à ce courant de pensée. Ainsi, dans le cadre du proto-émergentisme on peut citer le "British emergentism" décrit ainsi par [Van de Vijver 97] : "[…] est le terme introduit par Brian McLaughlin pour caractériser une tradition qui commence au milieu du XIX siècle et qui connaît son apogée dans le premier quart de notre siècle. McLaughlin réfère, entre autres, aux travaux de John Stuart Mill, Alexander Bain, George Henry Lewes, Samuel Alexander, Lloyd Morgan et C.D. Broad". On peut également citer C.L. Morgan (éthologue), J.C Smuts, W. Wheeler (entomologiste) et Alfred North Whitehead (mathématicien) qui entre 1920 et 1930 contribuèrent à enrichir la notion d'émergence.

Les proto-émergentistes cherchaient surtout à définir l'émergence afin de reconnaître un phénomène émergent et le différencier de phénomènes explicables grâce à d'autres théories ou modèles. Ainsi, le processus d'émergence est vu comme une boîte noire. On ne peut discerner que les entrées de plus bas niveaux et les sorties de plus hauts niveaux. On ne sait pas comment les entrées sont transformées et reliés aux sorties (cf. Figure 1).

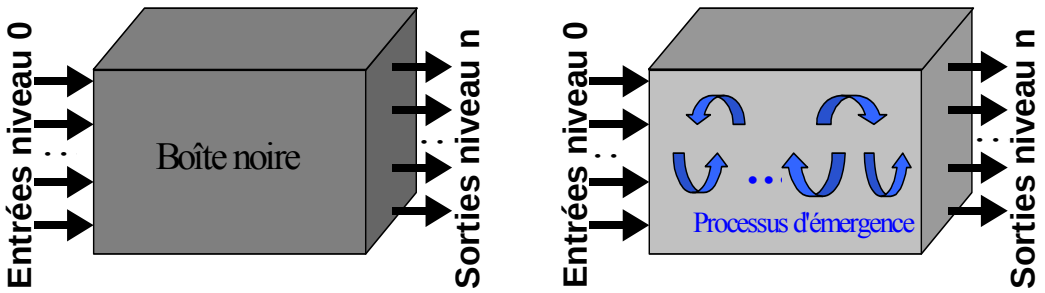

Figure 1. Proto-émergentisme: l'émergence comme une boîte noire. Néo-émergentisme: comprendre et manipuler l'émergence

Mais ce n'est que dans la deuxième moitié du XXe siècle que la science s'est dotée de moyens permettant d'explorer cette boîte noire. On peut appeler la recherche récente sur l'émergence le **néo-émergentisme**. Elle est liée à la théorie de la complexité actuelle et prend ses racines dans diverses approches comme la dynamique des systèmes en physique, en mathématiques et en informatique. Nous

pouvons maintenant ouvrir la boîte noire grâce aux découvertes de constructions mathématiques pertinentes et de nouvelles méthodes de recherche ainsi que grâce à la puissance des ordinateurs actuels.

Le néo-émergentisme essaye de développer des outils, des méthodes et des constructions qui rendent le processus d'émergence moins opaque et par conséquent moins miraculeux. Pour cela, il se base, entre autre, sur :

- **la théorie des systèmes complexes adaptatifs** (Santa Fe Institute : Holland, Kauffman, Langton) L'émergence fait référence aux patterns du macro niveau apparaissant dans les systèmes d'agents en interaction.
- **la théorie des systèmes dynamiques non linéaires** issue de la théorie du chaos. Le travail porte en grande partie sur les attracteurs.
- **l'école synergétique** fondée par Hermann Haken (1981) qui étudie l'auto-organisation dans les systèmes physiques.
- **la thermodynamique Loin et autour de l'Equilibre** introduite pas Ilya Prigogine. Les phénomènes émergents sont les structures dissipatives apparaissant à partir de conditions Loin de l'Equilibre.

2.2. Définition

Plutôt que de prétendre donner une définition exacte et exhaustive de l'émergence, nous donnons, à partir de définitions tirées de la littérature, les particularités qui nous semblent fondamentales pour cerner de façon précise la notion d'émergence.

Nouveauté

"D'une part, l'émergence présuppose qu'il y a **apparition de nouveauté** – propriétés, structures, formes ou fonctions –, et d'autre part, elle implique qu'il est **impossible de décrire, d'expliquer ou de prédire** ces nouveaux phénomènes en termes physiques à partir des conditions de base définies aux niveaux inférieurs" [Van de Vijver 97].

"Théorie selon laquelle la combinaison d'unités d'un certain ordre réalise une entité d'ordre supérieur dont les **propriétés sont entièrement nouvelles**" [Lewes 75] [Grumbach 97].

Auto-organisation

"L'émergence fait référence à l'apparition durant le processus d'auto-organisation dans un système complexe de structures ou de schémas ("patterns") ou de propriétés nouvelles et cohérentes" [Goldstein 99].

Irréductibilité

"Churchland définit l'émergence en termes d'irréductibilité des propriétés associées à une théorie de haut niveau à des propriétés associées à des composants dans une théorie de plus bas niveau" [Ali 97].

Interdépendance des niveaux

"Des structures et/ou des fonctions apparaissent à un niveau macroscopique sans que la seule observation des propriétés des constituants permette de les prédire" [Atlan 00] [Atlan 79].

Langton [Langton 90] définit l'émergence en termes de relation de feedback entre les niveaux dans un système dynamique. Les micro-dynamiques locales causent les macro-dynamiques et les macro-dynamiques globales contraignent les locales.

Qu'est-ce qui nous permet alors de juger du caractère émergent d'un phénomène ? Les propriétés inter-reliées, communes qui permettent d'identifier le phénomène comme émergent sont :

- l'observation d'un phénomène ostensible (qui s'impose à l'observateur) au niveau global ou macro,
- la nouveauté radicale du phénomène (il n'est pas observé au niveau micro et n'est pas prévisible),
- la cohérence et la corrélation du phénomène (il a une identité propre mais liée fortement aux parties qui le produisent),
- l'observation d'une dynamique particulière (le phénomène n'est pas prédonné, il y a "auto-maintien" du phénomène).

Pour construire un système exhibant ces propriétés, il faut le doter d'un certain nombre de caractéristiques.

2.2.1. La non-linéarité

La linéarité permet une traçabilité analytique des interactions locales jusqu'au phénomène global. Il n'y a donc pas apparition de nouveauté radicale et donc pas d'émergence possible. Il faut donc que les parties du système interagissent de façon non linéaire. Ainsi, une partie du système doit pouvoir être influencée par une autre partie même si elle ne lui est pas directement rattachée. On peut par exemple utiliser des boucles de feedback négatif ou positif qui sont non linéaires par nature.

2.2.2. Proche/Loin de l'équilibre (multi- non- ou à partir de l'équilibre)

Au début, les théories cherchaient à comprendre comment des systèmes tendent vers un état final d'équilibre ou homéostasie. La théorie de la complexité s'intéresse plus aux conditions autour de l'équilibre qui entretiennent l'émergence. L'amplification des événements aléatoires est une des raisons clés pour lesquelles l'émergence fait apparaître des caractéristiques imprédictibles.

2.2.3. L'auto-organisation

Dans la théorie des premiers systèmes, cela faisait référence au processus d'auto-régulation. En théorie de la complexité on fait référence au comportement créatif et auto-généré qui produit les changements, ainsi qu'à la recherche d'adaptabilité d'un système complexe. Le système doit être capable de se modifier d'une façon ou d'une autre afin de changer de comportement en fonction de son environnement.

2.2.4. Les attracteurs

Dans la théorie des premiers systèmes, le seul attracteur valide était celui qui amenait à un état final d'équilibre. Le fait d'utiliser un seul type d'attracteur simple avec comme finalité un état d'équilibre conduit à la prévisibilité du système. En théorie de la complexité, il y a de nouveaux types d'attracteurs (le point fixe, le cycle limite et l'attracteur étrange). Ces attracteurs ne sont pas prédonnés dans le sens de la "Gestalt". Ils ne dictent donc pas au système l'état à atteindre mais lui donnent seulement les moyens de changer.

2.2.5. La dynamique

La non-linéarité et les nouveaux attracteurs permettent cette métamorphose quantitative et qualitative du système si particulière. Tout doit donc être fait pour permettre au système d'exhiber un dynamisme suffisant pour en profiter et ainsi, tout en se maintenant dans des états proche/loin de l'équilibre, permettre l'auto-organisation qui conduit au phénomène émergent.

3. L'émergence en informatique

Depuis près de quinze ans, tout un champ de recherche s'est peu à peu créé autour de l'émergence afin d'en exploiter les caractéristiques si particulières au sein de systèmes informatiques [Holland 97] [Odell 00]. "*Emergent Computation*" [Forrest 90] [Forrest 91] est le terme employé en général pour désigner cet axe dans lequel se situent nos travaux.

Malgré l'effort de recherche mené, l'émergence reste un phénomène peu connu et on pourrait même dire un peu mystérieux. Nous allons donc donner une définition "utilitaire" avec une coloration fortement informatique. Nous la décomposons en trois parties : ce que l'on veut faire émerger, à quelle condition il y a émergence et comment nous nous en servons.

Objet	Un système informatique a pour finalité de réaliser une fonction adéquate à ce que l'on attend du système. C'est cette fonction, pouvant évoluer au cours du temps, que nous voulons faire émerger.
Condition	Cette fonction est émergente si le codage du système ne dépend aucunement de la connaissance de cette fonction. Ce codage doit contenir des mécanismes permettant l'adaptation du système au cours de ses échanges avec l'environnement afin de tendre à tout instant vers la fonction adéquate.

Méthode	Dans la théorie AMAS[1] [Capera 03][Georgé 03], pour changer la fonction il suffit de changer l'organisation des composants du système. Ces mécanismes sont spécifiés par des règles régissant l'auto-organisation entre les composants et ne dépendant pas de la connaissance de la fonction collective.

4. Les domaines scientifiques connexes

Le phénomène d'émergence, tel qu'il est perçu, étudié et manipulé de nos jours, prend ses racines dans des domaines scientifiques variés (cf. Figure 2). En partant de l'étude de systèmes simples, linéaires et en équilibre (General Systems Theory, Cybernetics, Information Theory) et en s'inspirant de phénomènes naturels en physique et en biologie (Evolutionary Biology, solid state/condensed matter physics) et de leur théories associés (Catastrophe Theory, Dynamical Systems, Fractal Geometry), l'étude s'est progressivement portée sur les propriétés de non linéarité, d'auto-organisation, de non équilibre, d'attracteurs (Complex Adaptive Systems, Non-linear Dynamical Systems, Chaos Theory, Far from Equilibrium Thermodynamics, …).

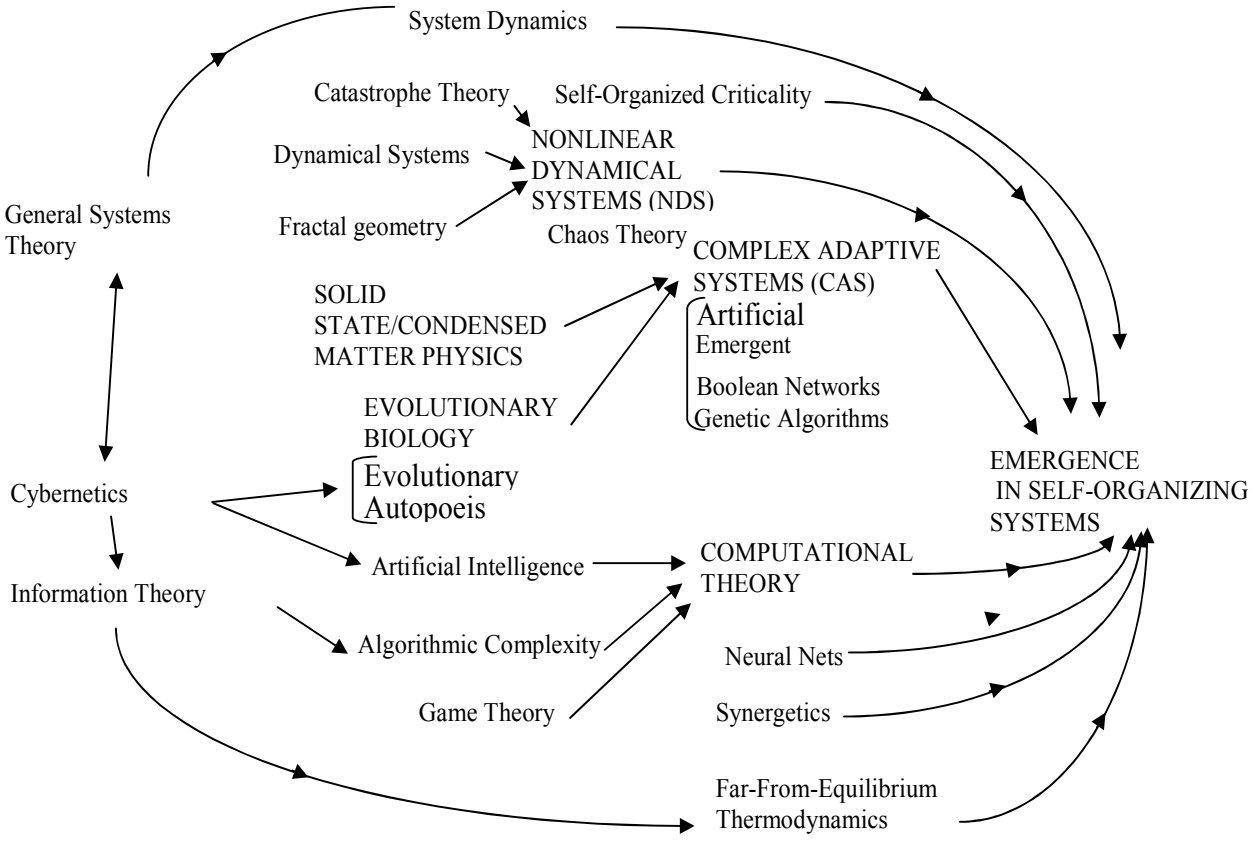

Figure 2. Les domaines scientifiques associés à l'émergence [Goldstein 99].

[1] AMAS : Adaptive Multi-Agent Systems. Cf. www.irit.fr/SMAC

5. Nécessité/utilité du concept d'émergence

5.1. L'émergence pour la compréhension

La première utilité de la notion d'émergence apparaît lors de l'étude de systèmes complexes et des phénomènes observables produits par ces systèmes. Il s'oppose alors au concept de réductionnisme mis en échec pour expliquer ces phénomènes. On va en fait faire appel à la notion d'émergence lorsque la configuration et l'interaction des composants d'un système offre plus d'explications sur les dynamiques et phénomènes observés que les explications basées sur les parties seules. Les phénomènes observés sont alors expliqués par la notion d'émergence et sont dès lors caractérisés par le fait qu'ils ne sont ni prédictibles, ni déductibles, ni réductibles aux seules parties [Goldstein 99].

En faisant la distinction entre macro niveau (le niveau de l'émergent) et micro niveau (les parties et leur interactions), on admet qu'une explication des dynamiques du système ne peuvent être réduites uniquement aux parties de plus bas niveau et qu'on peut se permettre ce "saut" pour ensuite manipuler les phénomènes émergents en tant que tels.

En fait, l'émergence ne se veut pas tellement une explication à proprement parler des phénomènes observés mais plutôt un terme descriptif des patterns, des structures et des propriétés obtenus au macro niveau. On peut alors se focaliser sur l'étude de ces phénomènes et des lois qui les régissent. Concrètement, sans pour autant expliquer les phénomènes émergents, on peut étudier, par exemple, leurs conditions d'apparition, leurs variations, les corrélations entre phénomènes émergents, les dynamiques intrinsèques, etc…

Pour finir, l'émergence est donc un moyen pour décrire la nécessité d'aller au macro niveau et ses dynamiques particulières, ses lois, ses propriétés, dans le but d'expliquer de manière plus adéquate ce qui est observé. Les études sur l'émergence permettent de construire les outils nécessaires, les méthodes et les constructions (systèmes artificiels, modèles) afin de mieux étudier le phénomène d'émergence et les systèmes dans lesquels il se produit.

5.2. Utilisation de l'émergence au sein de systèmes artificiels

"*Emergent Computation*" est le terme très général pour désigner toute utilisation de l'émergence par des informaticiens. L'idée n'est pas nouvelle comme les montrent les deux paragraphes suivants basés sur la volumineuse introduction de Stéphanie Forrest pour les "*Proceedings of the ninth annual CNLS conference*" [Forrest 90], conférence montrant bien toute la diversité de la computation émergente mais également à quel point elle était balbutiante.

La computation émergente s'efforce de produire un **comportement global** intéressant à partir de **nombreuses petites interactions**. Cela inclut les modèles connexionnistes, les systèmes classifieurs, les automates cellulaires, les modèles biologiques, les modèles de vie artificielle, et l'étude de la coopération dans les systèmes sociaux sans autorité centrale.

Le principe de base ressemble à celui de la computation parallèle dans le sens où elle s'efforce de décomposer des systèmes complexes en sous-unités indépendantes qui interagissent. Mais là où la computation parallèle requiert une contraignante supervision pour contrôler le bon fonctionnement du système et où les performances sont considérablement inférieures à une fonction linéaire du nombre de processeurs, la computation émergente va exploiter ces interactions. On obtient ainsi un gain d'efficacité, de flexibilité ou une représentation plus naturelle.

Près de quinze ans après, l'utilisation de l'émergence s'est amplement répandue dans le domaine de l'Informatique. De nombreuses disciplines ou champs d'étude manipulent le terme "émergence", tels que la Vie Artificielle, l'*Evolutionary Computation* (Algorithme Génétiques et *Genetic Programming*), les Réseaux Neuronaux, les *Ants Algorithms*, les Automates Cellulaires, les Systèmes Multi-Agents, la Simulation (de systèmes physiques, chimiques, biologiques, sociaux), la Robotique, l'Intelligence Artificielle Distribuée,… Cette synergie interdisciplinaire autour de ce concept encore inexploité peut sembler prometteur et aboutir rapidement à une utilisation répandue et concrète de l'émergence dans les travaux informatiques.

Mais lorsque l'on étudie plus en profondeur un panel de travaux tirés de tous ces champs, on s'aperçoit que la notion d'émergence est fortement sujette à interprétation, et ce même au sein de la même discipline. En fait, souvent, l'émergence est utilisée seulement au sens d'une apparition de propriétés à un certain niveau qui n'existent pas au niveau en dessous, sans prendre en compte les caractères d'irréductibilité et d'imprédictibilité [Brunner 02]. Parfois ce n'est même qu'une façon de parler pour désigner l'apparition d'évènements pourtant entièrement descriptible en terme de causalité.

Pourtant, pour atteindre les buts que se fixe l'informatique moderne dans le domaine de systèmes complexes, la "maîtrise" des phénomènes émergents semble, sinon une nécessité, du moins une voie prometteuse. A mon sens, cela nécessite l'élaboration de *théories de l'émergence* qui posent à la fois un cadre scientifique rigoureux quand à la définition de l'émergence, et fournissent, à travers une certaine compréhension de l'émergence, les moyens techniques pour effectivement construire des systèmes artificiels correspondant à la définition. Particulièrement, je pense qu'il faut insister sur le fait que le système ne doit pas et ne peut pas contenir explicitement la connaissance du but du système (i.e. de la fonction émergente) et des moyens d'y arriver. Il faut garder la même abstraction entre les parties du système artificiel et la fonction émergente que dans la définition de l'émergence.

La théorie AMAS [Capera 03][Georgé 03] est, en ce sens, potentiellement une théorie de l'émergence pour la manipulation de systèmes complexes adaptatifs.

6. Exemples de systèmes émergents

Pour finir de clarifier l'émergence, on peut citer quelques exemples de phénomènes qui semblent être émergents à la vue de ce qui précède : les constructions des insectes sociaux (fourmis, termites, …), les phénomènes sociaux (embouteillages, applaudissements,…), les phénomènes économiques, la circulation de l'information sur Internet, les automates cellulaires (comme le jeu de la Vie), …

En Physique et Chimie, les interactions entre des éléments simples donnent naissance à des structures complexes dotées de propriétés totalement nouvelles. En Biologie, de nombreux systèmes naturels composés d'individus autonomes exhibent des aptitudes à effectuer des tâches qualifiées de complexes sans contrôle global. De plus, ils peuvent s'adapter à leur milieu soit pour y survivre, soit pour améliorer le fonctionnement du collectif. C'est le cas des colonies d'insectes sociaux tels que les termites, les fourmis [Bonabeau 97]. Le fonctionnement du système immunitaire est lui aussi représentatif du fonctionnement d'un système complexe composé d'un ensemble d'agents autonomes.

6.1. Systèmes physiques : le système de Bénard

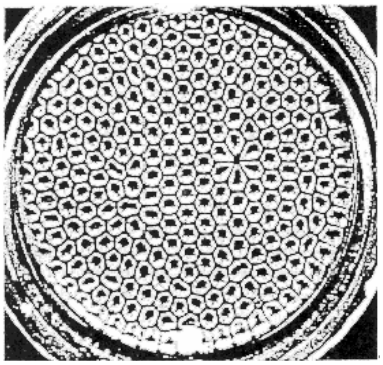

Figure 3. Réseau de cellules de Bénard vu de dessus

[Gleick 87] Dans les systèmes complexes physiques, des phénomènes émergents apparaissent typiquement dans des états de non-équilibre proche du chaos. En effet, l'équilibre pour un système empêche l'auto-organisation et le garde stérile alors que le non-équilibre permet l'apparition d'organisations nouvelles et de créativité. Ceci peut-être observé dans des situations tout à fait courantes comme lorsque l'on fait chauffer de l'eau dans une casserole. La chaleur est transmise par un flux tout d'abord régulier du fond vers la surface par conduction. Lorsque l'on continue à chauffer, on quitte cet état d'équilibre pour un état loin de l'équilibre dû à la différence de température entre les deux régions qui fait que la gravité s'exerce plus intensément sur les couches supérieures, plus froides et donc plus denses. Ceci conduit à l'apparition progressive de circulations chaotiques du fluide (remous et tourbillons) qui s'intensifient jusqu'à l'état d'ébullition. Mais avant l'ébullition à proprement parler, il y a un point critique où il n'y a pas encore de grands courants de circulation pour permettre la dispersion rapide de la chaleur au sein du fluide. On observe alors une auto-organisation du système qui quitte son état chaotique et produit un réseau de courants hexagonaux appelés **cellules de Bénard** (cf. Figure 3). Si la température augmente, ce phénomène disparaît. On peut parler d'une certaine forme d'émergence car des millions de molécules, subissant une contrainte de l'environnement, s'auto-organisent pour former une structure observable cohérente.

6.2. Systèmes artificiels : les Automates Cellulaires et le Jeu de la Vie (Game of Life)

J.H. Holland, le "père" des algorithmes génériques cite les automates cellulaires dans son livre "Emergence – From Order to Chaos" [Holland 97]. Inventés par deux des plus renommés mathématiciens de notre siècle, Stanislas Ulam et John von Neumann, ils sont remarquables par leur simplicité. Le "Jeu de la Vie" est une des instances les plus étudiées de ces automates cellulaires.

Il suffit de concevoir une grille, comme pour un jeu de Dames, où chaque case peut prendre la valeur 0 ou 1. Le 0 signifiant que la case est "morte", le 1, qu'elle est "vivante". Ensuite, chaque "cellule" ainsi définie, possède quelques règles très simples de fonctionnement qui régissent son évolution.

- Si une cellule morte a exactement 3 voisines vivantes, elle devient vivante.
- Une cellule vivante survit si elle a exactement 2 ou 3 voisines vivantes.
- Dans tous les autres cas, la cellule meurt ou reste morte i.e. 4 ou plus, elle est étouffée, 1 ou 0, elle meurt d'isolement.

Que peut-on faire avec des règles aussi simples ? En fait, si on pose certaines configurations de cellules sur une grille, on peut observer des phénomènes surprenants. L'exemple le plus populaire reste le "planeur" (cf. Figure 4). En faisant évoluer cette configuration de cellules rapidement on observe le "planeur" qui suit une trajectoire descendante, en regagnant sa forme d'origine toutes les 4 étapes.

Il existe un grand nombre de ces "configurations remarquables" dont les plus complexes donnent, par exemple l'impression, sur une grande grille, de voir un train à vapeur se déplacer de gauche à droite, avec la fumée s'échappant de la cheminée. Elles ont toutes en commun le fait d'être régies par les mêmes règles de base et que le résultat observable et interprété ne peut être prédit.

Dans une vision plus informatique des choses, la théorie veut que l'on puisse ainsi simuler une Machine de Turing, les signaux transitant sous forme de groupes de cellules comme le planeur, et venant modifier l'état de certaines configurations stables.

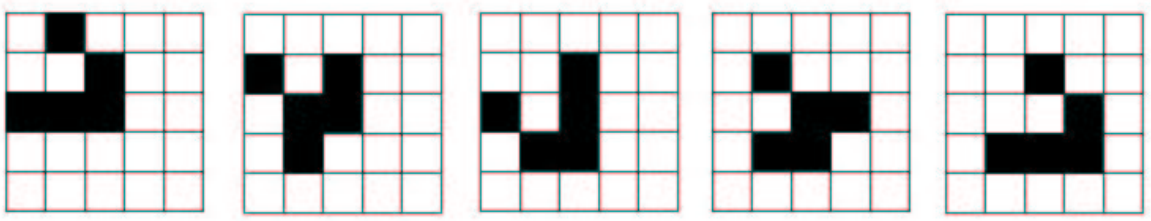

Figure 4. Evolution du "planeur" sur 5 étapes. On retrouve la même configuration de cellules à l'étape 5, qu'à l'étape 1, mais elles sont décalées vers le bas et vers la droite.

6.3. Insectes sociaux : l'expérience du double pont et des fourmis

Il existe de nombreux phénomènes émergents issus du comportement des insectes sociaux tels que les fourmis ou les termites. Cela n'a rien de surprenant car si l'on prend par exemple une colonie de fourmis, ce système, bien évidement complexe, contient tous les "ingrédients" pour des phénomènes émergents : grand nombres d'entités autonomes, nombreuses interactions, fonctionnement simple des entités, capacités proprioceptives et cognitives limitées, système confronté à un environnement dynamique, fonctionnements de haut niveau remarquables et nécessaires à la survie.

Certainement l'un des exemples les plus simples, l'expérience du double pont de fourmis permet d'illustrer, à partir d'un nombre limité de paramètres et donc d'une connaissance complète du problème, l'apparition d'un phénomène de haut niveau qui n'est pas décrit dans le fonctionnement des parties.

Pour cette expérience (observé sur des fourmis ou simulé), un groupe de fourmis partant d'un nid a deux chemins possibles pour atteindre un lieu de fourragement d'où elles doivent ramener de la nourriture au nid. L'un des deux chemins est plus court que l'autre. Les fourmis on un comportement très simple : si elles perçoivent des traces de phéromone, elles les suivent, s'il n'y en a pas, elles se déplacent aléatoirement, et dans tous les cas, elles déposent un peu de phéromone sur le chemin qu'elles empruntent. Au début les fourmis choisissent aléatoirement l'un ou l'autre des chemins. Mais au bout d'un moment, à cause des allers-retours, le chemin le plus court va se charger plus rapidement de phéromone, ce qui va entraîner encore plus de fourmis sur ce chemin. Au bout d'un certain temps, toutes les fourmis empruntent le chemin le plus court. Elles ont "trouvé" le chemin le plus court.

Pourtant, aucune fourmi n'a cartographié les parcours possibles, n'a évalué et comparé les temps qu'elle mettait, ni même en fait essayé de trouver le chemin le plus court. C'est en ce sens là que l'on peut dire que la découverte et la sélection du chemin le plus court est un phénomène émergent, issu du comportement collectif des fourmis qui n'ont que des règles de fonctionnement simples qui ne codent nullement cette recherche.

Cet exemple est intéressant par sa simplicité car il permet de bien imaginer le fonctionnement du système et donc de comprendre qu'il est "logique" que les fourmis finissent par choisir le chemin le plus court. Mais pourtant, lorsque l'on analyse seulement les règles des fourmis, on n'y reconnaît pas la recherche du plus court chemin. Ce n'est qu'en considérant le système dans sa globalité et en fonctionnement que ce phénomène s'explique. Il y bien une différence de niveau micro/macro et on peut parler de phénomène émergent.

6.4. Phénomènes sociaux : la synchronisation des applaudissements

Des phénomènes non supervisés issus de l'activité d'un grand nombre d'individus s'observent aussi dans les activités humaines [Goldstein 99]. Tout le

monde a pu observer la synchronisation des applaudissements après un concert ou une pièce de théâtre. Cette apparition de synchronisation à partir d'un ensemble désordonné d'applaudissements individuels, qui peut disparaître et réapparaître plusieurs fois, est un exemple classique d'auto-organisation. Très étudié en physique, cet exemple simple a permis d'obtenir des modèles mathématiques le décrivant et permettant d'étudier les conditions d'apparitions et de variations. Mais ce sont des modèles de haut niveau qui n'expliquent pas - à partir des individus - comment s'effectue la synchronisation.

6.5. L'eau

Cet exemple a été donné par Lewes. Les propriétés des gaz qui composent l'eau ne laissent pas prévoir celles de l'eau et réciproquement. [Grumbach, 97]. Si l'on considère une molécule d'eau isolée, la mécanique quantique nous fournit toutes les informations nécessaires, tel que les niveaux d'énergie par exemple, pour décrire son comportement. Mais si l'on met ensemble un certain nombre de molécules d'eau on obtient un **liquide** dont le comportement ne peut être décrit avec la même théorie qui décrit le comportement de ses constituants. Il faut faire appel aux théories sur l'hydrodynamique, très différentes de la mécanique quantique, pour obtenir des connaissances sur ce qui est observable à ce niveau supérieur. Les remous et les tourbillons n'existent pas au niveau des molécules.

Si l'on diminue la température, le liquide devient de la glace et on obtient encore de nouvelles propriétés. Par exemple, si on pousse un coté d'un bloc de glace, l'autre bout se déplace instantanément de façon identique. Ce qui n'est pas le cas ni de liquides, ni de gaz. On peut donc dire qu'une certaine quantité de molécules d'eau constitue un nouvel "objet" suffisamment complexe pour nécessiter des théories différentes suivant sa température.

C'est cette différence de niveau pour décrire les comportements des parties (les molécules) ou de l'ensemble du système (une certaine quantité de liquide) qui permet de parler d'émergence. Ce sont bien toutes les molécules d'eau en interaction qui confèrent au liquide ses propriétés mais nous sommes incapables de les analyser et de les comprendre au niveau moléculaire.

6.6. Le jeu d'échec

"L'émergence apparaît seulement quand les activités des parties ne s'additionnent pas simplement pour donner l'activité du tout. Pour l'émergence, le tout est en effet plus que la somme des ses parties. Pour illustrer ceci, examinons le jeu d'échec. Nous ne pouvons pas nous faire une image représentative d'un jeu en cours simplement en additionnant les valeurs des pièces sur l'échiquier. Les pièces interagissent pour se soutenir les unes les autres et pour contrôler différentes zones de l'échiquier. Cette structure de pouvoir basée sur l'imbrication, si elle est bien conçue, peut aisément soumettre un opposant avec de meilleures pièces mais mal alignées." [Holland 97].

Cet exemple illustre bien le fait d'obtenir grâce à l'organisation et donc à l'interaction une structure globale qui possède des caractéristiques particulières que l'observation des parties ne permet pas de prédire. Ceci est bien une des conditions pour que l'on puisse parler de phénomènes émergents. Mais il manque encore des éléments de dynamisme, de non-linéarité ou d'auto-organisation par exemple pour que l'on soit en présence d'émergence.

6.7. La conscience humaine

Un phénomène très surprenant chez l'homme est celui de l'apparition de la conscience. "*La conscience est une propriété du cerveau de niveau supérieur ou émergente au sens tout à fait banal de "niveau supérieur" ou d'"émergent"...*" [Searle 95]. Les avancées en neuro-biologie nous renseignement de plus en plus sur les interactions physico-chimiques complexes se déroulant au sein de notre cerveau. Pourtant il semble bien illusoire de parvenir à comprendre un phénomène aussi complexe que la conscience en n'observant que les neurones et leurs interactions.

Le cerveau est typiquement un système complexe, constitué d'un grand nombre de parties en interactions non-linéaires, confronté à un environnement dynamique, capable d'adaptation et d'apprentissage, et exhibant à un niveau supérieur des phénomènes particuliers (conscience, réflexion, mémoire) non explicable au vu des parties.

Et pourtant nous pensons.

Bibliographie

[Ali 97] Ali, S. M., Zimmer, R.M., "The question concerning emergence", CASYS'97, Abstract Book, First International Conference on Computing Anticipatory Systems, CHAOS 1997.

[Atlan 00] Atlan, H., "*La finalité*", Hors série Science&Avenir, 2000.

[Atlan 79] Atlan, H., "*Entre le cristal et la fumée*", Seuil 1979.

[Bonabeau 97] Bonabeau E, Theraulaz G., "Auto-organisation et comportements collectifs : la modélisation des sociétés d'insectes", *In Auto-organisation et comportement,* Editions Hermès, 1997.

[Bourjot 99] Bourjot, C., Chevrier, V., Bernard, A., Krafft, B., "Coordination par le biais de l'environnement : une approche biologique", *Journées Francophones Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents JFIADSMA '99*, Editions Hermès 1999.

[Brunner 02] Brunner, K.A., "What's Emergent in Emergent Computing", *In Proceedings of the,EMCSR,* R. Trappl (ed.), 2002.

[Camazine 02] Camazine, S., Deneubourg, J.-L., Franks, N., Sneyd, J., Theraulaz, G. and Bonabeau, E., " Self-organization in biological systems ", *Princeton University Press*, 2002.

[Capera 03] Capera, D., Georgé, J-P., Gleizes, M-P., Glize, P., "The AMAS theory for complex problem solving based on self-organizing cooperative agents", *TAPOCS*, Linz, Autriche, 2003.

[Drogoul 99] Drogoul, A., "Intelligence diffuse : vers un monde fait d'agents ?" - *Journées Francophones Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents JFIADSMA '99*, Editions Hermès 1999.

[Forrest 90] Forrest, S., "Emergent computation: self-organizing, collective, and cooperative phenomena in natural and artificial computing networks", *Proceedings of the ninth annual CLNS conference,* 1990.

[Forrest 91] Forrest S., "Emergent computation : Self-organizing, Collective, and cooperative phenomena in Natural and Artificial Computing networks", *Special issue of Physica D* ,MIT Press / North-Holland, 1991.

[Georgé 03] Georgé, J-P., "Conception de systèmes adaptatifs à fonctionnalité émergente : la théorie Amas ", *Revue RIA n°4/2003,* 2003.

[Gleick 87] Gleick, J., "La Théorie du Chaos, vers une nouvelle science", *Champs Flammarion,* 1987.

[Goldstein 99] Goldstein, J., "Emergence as a Construct : History and issues", *Emergence Volume 1, Issue 1, pp 49-71*, 1999.

[Grumbach 97] Grumbach, A., "A propos d'émergence. Emergence…ou…explication", *Intellectica Emergence and explanation* 1997/2 n°25, ISSN n°0984-0028 185-194, 1997.

[Holland 97] Holland, J. H., "Emergence – from Order to Chaos", *Addison-Wesley,* 1997.

[Horn 01] Horn, P., " Autonomic computing: IBM's Perspective on the State of Information Technology ", http://www.ibm.com/research/autonomic, 2001.

[Kim 00] Kim J., "L'émergence, les modèles de réduction et le mental" *Philosophiques, vol.27, n° 1*, 2000

[Langton 90] Langton C., "Computation at the edge of chaos, Phase transition and emergent computation", *Physica D Vol.4*, 1990

[Lewes 75] Lewes, G.H., "Problems of life and mind", *London : Kegan Paul, trench, Turbner, &Co,* 1875.

[McLaughlin 80] McLaughlin, B. P., Varela F., "Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living". London. *D. Reidel Publishing Company Holland*, 1980.

[Odell 00] Odell, J., "Agents (Part 2): Complex Systems", *Executive Report, Volume 3, Number 6, Cutter Consortium, Arlington, MA*, 2000.

[Searle 95] Searle, J. R. , "La redécouverte de l'esprit", *Editions Gallimard*, 1995.

[Van de Vijver 97] Van De Vijver, G., "Emergence et explication", *Intellectica : Emergence and explanation,* 1997/2 n°25, ISSN n°0984-0028 185-194, 1997.

[Weiser 96] Weiser, M.,Brown, J. S., "Designing Calm Technology", *PowerGrid Journal*, Vol1. N°1, http://powergrid.electriciti.com/1.01, 1996.