

Première partie
Contexte Scientifique

Chapitre 1

Introduction générale

Sommaire

1.1	Introduction	4
1.2	Problématique	5
1.3	Le tas de sable et le fourmilion	7
1.3.1	Un modèle	9
1.3.2	Propriétés	13
1.3.3	Vers une utilisation de la métaphore	13

1.1 Introduction

Ce document présente mes activités d'enseignant-chercheur à l'université du Havre. Il résume mon investissement personnel et ma contribution au développement de ma discipline, l'informatique, dans le cadre bien précis de l'université du Havre. L'aspect enseignement et administration y a sa part même s'il a été relégué en dernière partie (part. III) de ce mémoire. Une discipline existe et (sur)vit dans une petite université uniquement si elle s'appuie sur des filières d'enseignements cohérentes et si elle trouve sa place dans un laboratoire et une communauté. Mes activités dès ma nomination en 1993 comme maître de conférences se sont donc exercées dans cette optique. Les premières années ont été consacrées au montage d'une filière informatique complète afin de faciliter l'émergence d'une activité de recherche significative validée par une reconnaissance d'un laboratoire en 2000 comme équipe d'accueil (EA 3219) et la mise en place d'une formation doctorale le DEA ITA (Informatique Théorique et Applications) de l'école doctorale SPMI (Sciences Physiques et Mathématiques pour l'Ingénieur) des universités du Havre et de Rouen.

Les travaux que j'expose ne m'appartiennent pas et sont le fruit d'un travail collectif et on peut même espérer qu'ils sont un exemple d'intelligence en essaim ? Chacun y a sa part et son mérite que ce soit mes collègues ou les étudiants que j'ai encadrés ou co-encadrés. Le je ou le nous ne sont donc que des figures de style souvent bien maladroit.

Un travail de recherche n'est jamais achevé, pris par la flèche du temps, c'est une trajectoire irréversible, mais dans laquelle les rétroactions jouent. La flèche se referme sur elle-même et la causalité n'est plus linéaire, les causes ne précèdent pas obligatoirement leurs effets. Ce que l'on génère tout au plus c'est de l'auto-organisation. Le travail présenté n'est donc qu'un point de la trajectoire, il est inachevé, souhaitons néanmoins pour prendre une analogie avec les écosystèmes qu'il soit passé du stade juvénile ³ au stade mature ⁴.

L'objectif de cette introduction générale est donc de tenter de définir ma problématique de recherche, son positionnement scientifique, la démarche utilisée et les réponses apportées dans un cadre général.

³Un écosystème juvénile se caractérise par une stratégie de croissance, la biomasse explose. Le système consomme des ressources de façon quasi-illimitée et produit des déchets de façon illimitée.

⁴Un écosystème mature se caractérise par une stratégie de développement en terme de diversité et non de quantité avec émergence parfois spontanée d'espèces qui se multiplient, en affinant leurs stratégies d'évolution adaptatives. Il y a consommation faible de ressources et des flux de matière quasi-cycliques.

1.2 Problématique

La physique, la biologie, l'informatique ou encore les sciences humaines nous offrent de nombreux exemples de systèmes dont le comportement global résulte des interactions entre des entités homogènes ou hétérogènes. Nous pouvons citer sans être exhaustif : les bancs de poissons, les nuées d'oiseaux [Chaté and Grégoire, 2004], les colonies de bactéries [Ben-Jacob and Levine, 2004] (cf. figure 1.1), les tas de sable [Bak, 1996], les automates cellulaires [Wolfram, 1984], les réseaux d'interaction et de régulation dans le domaine de la protéomique [Amar et al., 2004], les sociétés d'insectes [Bonabeau et al., 1999], le système immunitaire [Janeway et al., 2001], les villes [Provitolo, 2002], les langues naturelles [Walter, 1994].

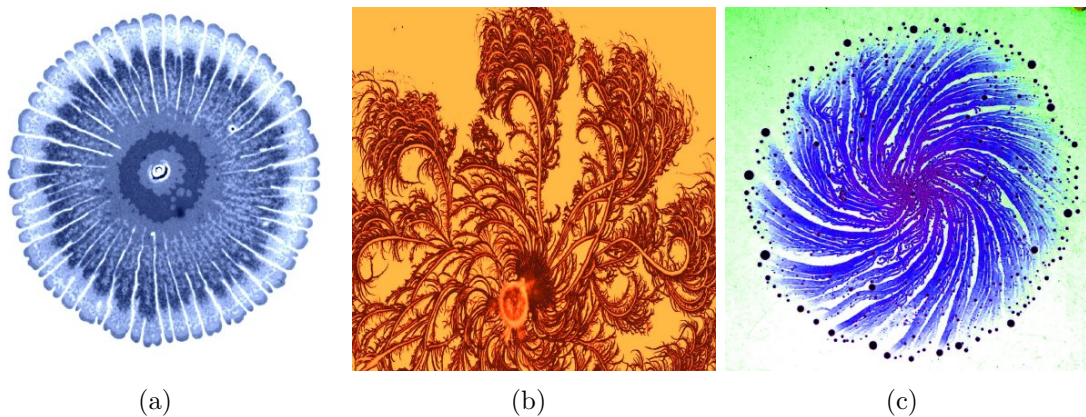


FIG. 1.1 – Interaction et auto-organisation au sein d'une colonie de bactéries. Ce sont des photographies de boîte de Pétri sur lesquelles on constate que les colonies de l'ordre d'une dizaines de milliards d'individus se structurent en réponse à une stimulation externe. Ces images proviennent du laboratoire de Pr. Eshel Ben-Jacob, de l'université de Tel Aviv.

Les notions d'interaction et de système sont centrales, c'est par leur intermédiaire que des propriétés locales et globales vont se dégager. Les interactions s'expriment au sein d'un réseau en perpétuelle reconfiguration. Le système peut être éventuellement complexe ou pas, mais en tout état de cause les systèmes étudiés présentent une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- Le graphe/réseau d'interaction est non trivial, des interactions se créent, disparaissent, évoluent et il existe éventuellement des interactions de différente nature.
- Le système n'est pas centralisé, les interactions sont locales.
- Les informations sont locales en général.
- Il existe des boucles de rétroaction via d'autres entités ou par l'intermédiaire de l'environnement.
- Le système est ouvert structuré par les flux d'énergie, de matière et d'information.

L'informatique (cf. fig 1.2) à laquelle je m'intéresse poursuit principalement deux objectifs :

- *Bio-informatique*, tenter de comprendre et d'expliquer le fonctionnement et l'organisation de systèmes, le plus souvent complexes, du monde vivant par la conception de modèles et la mise en œuvre de simulations.
- *Bio-inspiré*, élaborer de nouveaux modèles conceptuels et définir de nouvelles approches adaptées aux caractéristiques des systèmes informatiques distribués et parallèles en s'inspirant des systèmes vivants et de leurs mécanismes spécifiques.

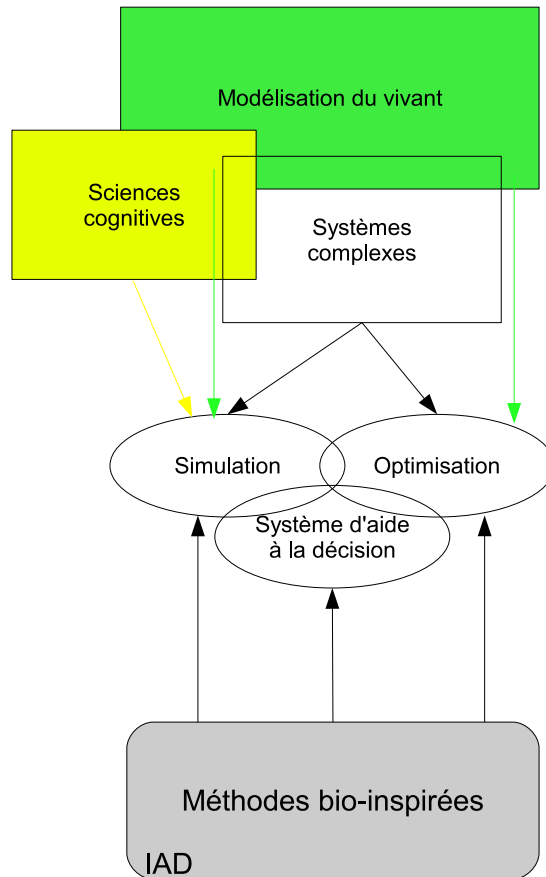


FIG. 1.2 – Positionnement scientifique et informatique

La modélisation informatique, la simulation permettent d'explorer le réel et en particulier le vivant en tentant d'incarner pour la première fois dans un matériel non biochimique des processus qui lui sont inhérents. De nombreux fonctionnements en œuvre sont intéressants, parmi ceux-ci on trouve par exemple les mécanismes adaptatifs, qu'ils soient d'apprentissage ou (néo)darwinien, mais également les processus perceptions/actions/réactions avec l'environnement, ceci conduisant parfois à des fonctionnalités émergentes. La notion d'incertitude y rode et sous ce terme se cachent des notions différentes, ainsi il peut s'agir des aspects dynamiques d'un phénomène qui empêchent toute modélisation statique ou entièrement déterministe ou encore cela peut être du à une connaissance partielle et incomplète.

Dans ce travail on peut y voir plusieurs finalités; tout d'abord permettre aux biolo-

gistes, écologues, épidémiologistes, médecins ... de simuler des processus naturels à l'aide d'environnements informatiques qu'ils pourraient facilement paramétrer de façon à tester, modifier, élaborer leurs modèles ; ensuite chercher de nouveaux modèles comportementaux à base de règles ou de lois offrant un niveau d'abstraction suffisant pour s'appliquer à un ensemble de systèmes naturels. On pense par exemple à des lois de type loi de puissance, par exemple, qui permettent de décrire des phénomènes invariant d'échelle, ou d'autres à établir mais aussi des caractéristiques comme le nombre d'attracteurs en fonction d'un paramètre comme le nombre d'interactions sans oublier les caractéristiques minimales pour voir apparaître de l'auto-organisation.

Enfin les systèmes naturels exhibent des propriétés très intéressantes telle que la robustesse mais aussi un caractère distribué et adaptatif ou encore un caractère complexe. Ils sont de ce fait une source d'inspiration pour l'informatique. La métaphore du vivant offre donc de nouveaux modèles qui utilisent la force brute de l'informatique souvent conduite par des heuristiques utilisant les propriétés et le comportement du système, les algorithmes génétiques en sont un exemple. Ils ont d'ailleurs été utilisés dans de nombreux domaines avec succès comme dans des problèmes d'optimisation ou d'ordonnement. Nous pensons que l'on peut aller dans une direction complémentaire en considérant un artefact informatique, au sens large, comme un écosystème computationnel ⁵, le contrôle s'effectuant par «auto-organisation» et le résultat étant un effet de bord, produit du calcul émergent. L'artefact informatique est alors vu comme un ensemble d'entités (processus, tâches, objets, agents ...) qui interagissent et évoluent dans un environnement ouvert partagé, dynamique et incertain.

1.3 Le tas de sable et le fourmilion

Par cet exemple, nous allons tenter d'illustrer la démarche utilisée dans notre travail. Les fourmilions ou fourmis-lions sont des insectes de la famille des myrmeleonidae appartenant à l'ordre neuroptères, ils ressemblent à des libellules (voir figures 1.3(d) et 1.3(e)). Ils présentent au repos des ailes étroites repliées en toit au dessus d'un long abdomen et ont des antennes courtes et massues. Ce sont des insectes crépusculaires ou nocturnes au vol lent.

Ce sont en fait les larves qui nous intéressent (voir figures 1.3(a) et 1.3(b)). En effet, elles creusent des pièges (voir figure 1.4) qui s'avèrent astucieux et redoutables pour attraper les petits insectes, et en particulier les fourmis (d'où les noms vernaculaires de fourmilion, ou de fourmi-lion). Les zones sablonneuses sont privilégiées car la granulométrie du substrat est fine et les trous de ce fait plus facile à réaliser, néanmoins on peut rencontrer des larves dans d'autres lieux. Le piège ressemble à un entonnoir et présente donc une forme bien particulière.

On peut décomposer le piège en deux parties, la partie haute et la partie basse. La partie haute est constituée de granulats secs et est de forme conique, par contre la partie basse est humide et verticale enduite de sécrétion buccale de la larve. Ceci constitue un goulot au fond duquel le fourmilion se dissimule en s'enrobant d'une fine couche de sable

⁵Certes c'est un néologisme, mais c'est aussi une réappropriation du substantif computation que les anglo-saxons nous ont emprunté pour faire computer - ordinateur -



(a) larve de fourmilion



(b) taille 10 mm, vie larvaire de 2 an environ



(c) cocon d'un fourmilion, durée de cette phase 3 semaines



(d) fourmilion adulte



(e) imago de 35 mm

FIG. 1.3 – Différents stades d'évolution d'un fourmilion

et ceci également grâce à ses sécrétions buccales. Les formes de la partie haute et de la partie basse ne sont pas anodines, en effet voici comment le piège fonctionne : un petit insecte imprudent va s'aventurer sur le haut du cône mais sa pente n'est pas le fruit du hasard son angle est l'angle maximum d'avalanche (environ 30°), la pente est donc très instable et notre malheureux va être embarqué par une avalanche de granulat et

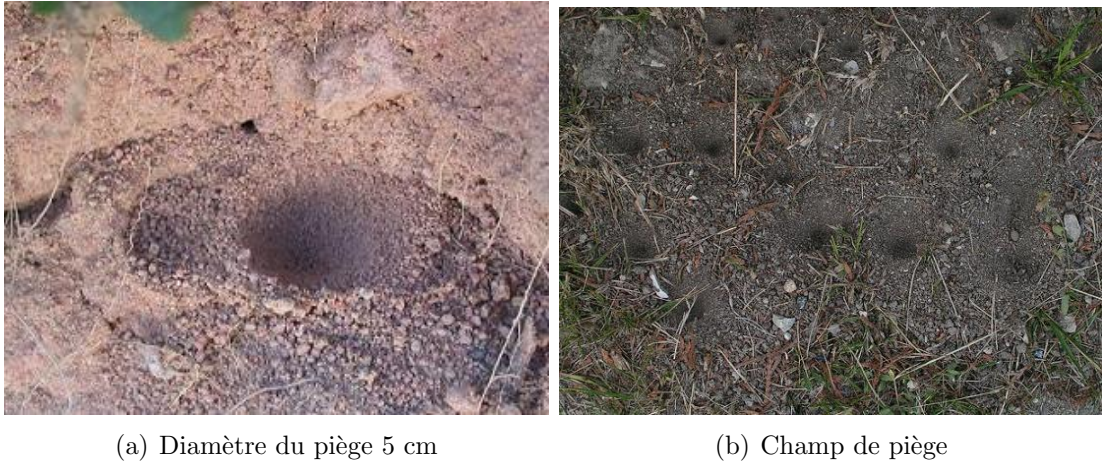


FIG. 1.4 – Pièges de la larve de fourmilion

il va amplifier le phénomène en se débattant. Si par hasard, notre imprudent n'est pas entraîné par une avalanche le fourmilion force le destin en projetant des grains au dessus de sa proie. Le lecteur intéressé pourra consulter [Swanson, 2006] où il verra comment le fourmilion construit le piège et attrape ses proies. [Duran, 2003] s'est interrogé sur la forme du piège et a constaté que si le piège était uniquement constitué de la partie haute, il fonctionnerait beaucoup moins bien puisqu'une fois l'avalanche produite, l'angle que fait la surface avec l'horizontale a diminué et constitue l'angle de repos du système, la pente est alors beaucoup plus stable [Rajchenbach, 2002]. En effet, la surface sur laquelle les grains issus de l'avalanche s'accumulent provoque une onde remontante qui va accumuler du sable vers le haut et du coup éloigner l'angle de la pente de l'angle d'avalanche. Le piège dans cette configuration ne peut fonctionner qu'un nombre limité de fois, mais notre ami le fourmilion, résultat d'une longue évolution, utilise un piège beaucoup plus sophistiqué que cela et ceci grâce à la partie basse. En effet, la configuration que nous venons de décrire correspond à un cratère fermé mais si l'on y ajoute la partie cylindrique de sable mouillée le cratère devient «ouvert». Si l'on considère que le fourmilion maintient ce cylindre toujours libre en rejetant les exosquelettes de ses victimes et les grains de sable surnuméraires à l'extérieur du piège, l'onde remontante ne se produit plus. La pente du piège est alors maintenue dans son état critique correspondant à l'angle maximum d'avalanche.

1.3.1 Un modèle

Considérons le modèle unidimensionnel suivant, sur une ligne se trouve N sites susceptibles d'accueillir un empilement de grains de sable. On note h_i la hauteur de l'empilement d'un site. On peut alors déterminer la pente locale entre le site i et le site $i + 1$ de la façon suivante : $z_i = h_i - h_{i+1}$. Si on ajoute un grain sur l'empilement du site i , $h_i \rightarrow h_i + 1$, $z_i \rightarrow z_i + 1$ et si l'on considère que le grain n'a pas été ajouté au système mais provient du système $h_{i-1} \rightarrow h_{i-1} - 1$. Lorsque la pente z_i atteint une valeur critique que nous appelons z_c un grain quitte l'empilement i pour rejoindre le $i + 1^{\text{ème}}$ empilement. Tout comme dans

le cas du fourmilion, on considère le système ouvert et donc le bord droit est libre. Le bord gauche est fermé et donc $z_0 = 0$. Illustrons cela par une figure avec $z_c = 1$ (figure 1.5).

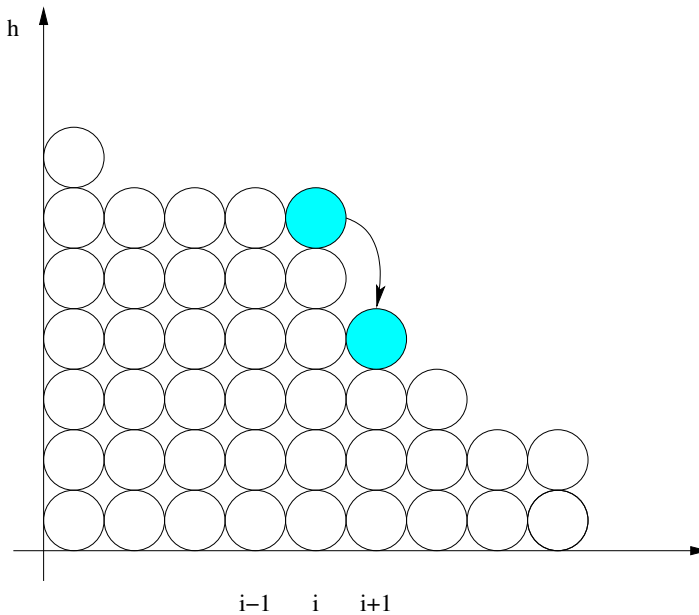


FIG. 1.5 – Modèle du tas de sable

Quelque soit la configuration initiale le système va s'organiser pour atteindre l'état d'équilibre qui est donc caractérisé par la configuration où la pente est égale à z_c (figure 1.6).



FIG. 1.6 – Tas de sable

Ainsi, si l'on part de cette configuration et que l'on ajoute à un endroit quelconque un grain de sable, le système évoluera jusqu'à éjecter le grain perturbateur par le bord droit (figure 1.7). Dans ce modèle l'avalanche est de taille N par contre si on étudie un modèle bidimensionnel le système évolue toujours vers un état critique auto-organisé mais moins trivial, puisque les avalanches peuvent être de n'importe quelle taille. Autrement dit, le système peut éventuellement trouver un état d'équilibre avant que la perturbation

atteigne le bord, cela se traduit par une loi de puissance⁶.

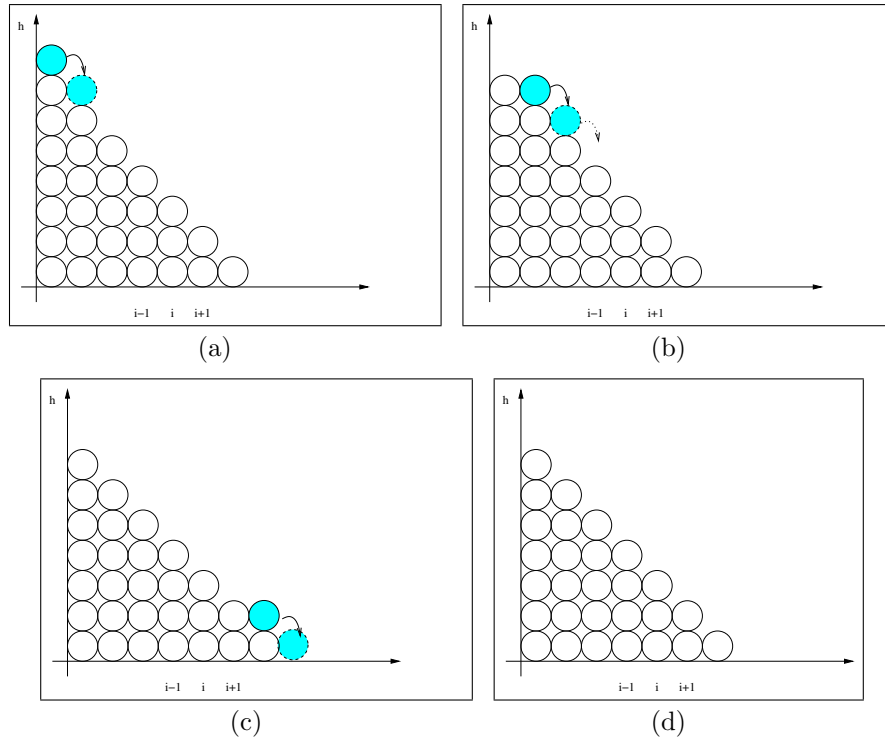


FIG. 1.7 – Auto-organisation d'un tas de sable

Le modèle informatique auquel fait penser le tas de sable immédiatement est un automate cellulaire. À partir d'un modèle simple, on peut simuler la formation d'un demi-tas de sable tel que nous venons de le décrire précédemment. L'automate cellulaire va évoluer dans un carré dans lequel on considère le tas comme une suite d'empilement de grain de sables. L'empilement i dépend uniquement de la hauteur de ses voisins $i - 1$ et $i + 1$ respectivement h_{i-1} , h_{i+1} . Le tas est défini par une suite de nombres qui représentent la hauteur de chaque empilement, le modèle est unidimensionnel.

Sachant que l'on cherche à simuler le comportement du tas de sable, la chute des grains et des avalanches de différente taille, on définit maintenant un fonctionnement d'automate cellulaire suivant :

- Conditions de simulation
 - On parcourt les cellules pleines de droite à gauche et de bas en haut ;
 - On ajoute sur le premier empilement régulièrement des grains de sable ;
 - Le tas de sable repose sur un support fini (ouverture du système).
- Règles d'évolution
 - *Règle 1 : mécanisme de chute.* Si une cellule vide c_{j-1} se trouve au dessous d'une cellule occupée c_j , la pile des cellules occupées $c_j, c_{j+1}, c_{j+2} \dots$ se déplace vers le bas, respectivement en $c_{j-1}, c_j, c_{j+1} \dots$ (figure 1.8).

⁶ Lorsqu'une variable X est distribuée en loi de puissance, il n'existe pas de grandeur caractéristique, ce qui signifie que si X représente la taille d'un événement elle peut être quelconque.

- Règle 2 : éboulement. Au niveau du tas de sable, on considère qu’une pile est un empilement de cellules pleines dont le voisinage droit est vide, cette pile est de hauteur $h \geq 1, h \in \mathbb{N}$. Si $h = 1$ alors la cellule pleine se décale à droite, sinon ($h > 1$) on détermine de façon aléatoire le nombre $n \in [1..h]$ de cellules pleines qui se décalent à droite (figure 1.9). La règle 1 est prioritaire sur la règle 2.

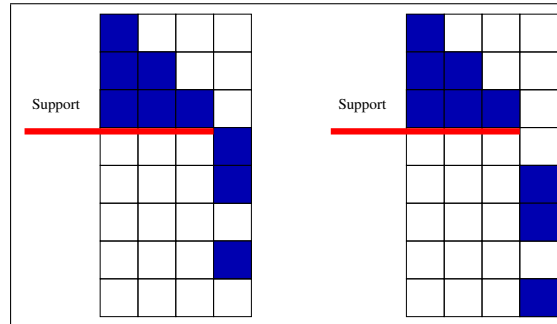


FIG. 1.8 – Mécanisme de chute

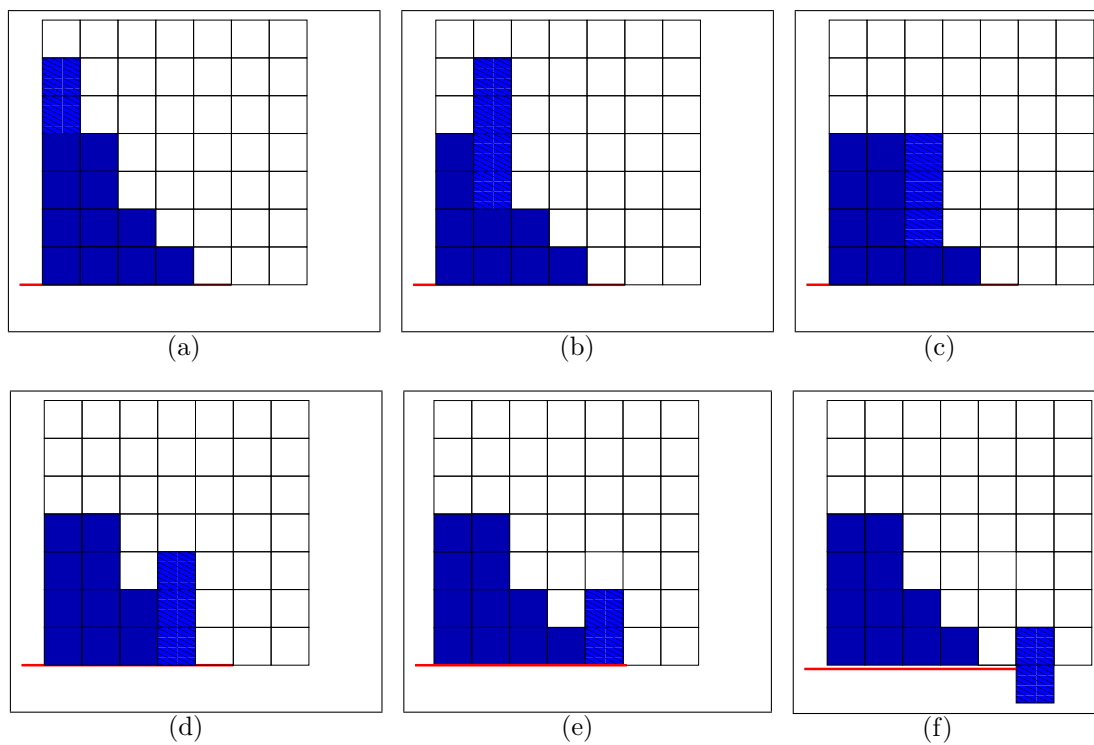


FIG. 1.9 – Exemple d'évolution de l'automate cellulaire

De l'aléatoire a été introduit ce qui rend l'automate non déterministe contrairement au cas général. Cet automate ne respecte pas le modèle unidimensionnel proposé par [Bak et al., 1988], mais ceci nous permet de modéliser des avalanches de taille variable comme celle observée dans le cas du fourmilion et l'automate confirme les observations faites par [Duran, 2003].

1.3.2 Propriétés

Il n'est pas dans notre propos d'étudier en détail l'exemple du fourmilion, mais nous voulons montrer au travers de cet exemple comment l'observation du vivant nous conduit à un modèle qui met en évidence des propriétés. Nous reviendrons par la suite sur certaines d'entre elles comme l'auto-organisation.

Un état critique est défini dans le cadre de la théorie des transitions de phases comme un point de séparation entre plusieurs phases, pour lequel la longueur de corrélation du système est divergente. Cette longueur de corrélation est la distance au-delà de laquelle deux éléments pris au hasard dans le système ne sont plus «en phase» ou bien encore corrélés. Pour avoir une transition de phases il faut un paramètre de contrôle. Ce type de transition de phase est du second ordre (non linéaire).

La notion de criticalité auto-organisée a été introduite par P. Bak, Tang et Wiesenfeld dans [Bak et al., 1987]. L'idée principale est que certains systèmes peuvent évoluer sans paramètre de contrôle, vers un état critique. Le système évolue alors naturellement vers un tel état, l'état critique auto-organisé étant un attracteur de la dynamique.

On doit donc faire la différence entre un point critique et un point critique auto-organisé. Ainsi un point critique traditionnel est une transition entre deux états stables (phases) (fig. 1.10(a)) du système alors qu'un point critique auto-organisé se trouve entre deux états instables du système (fig. 1.10(b)). Tout état instable tend à atteindre l'état critique auto-organisé.

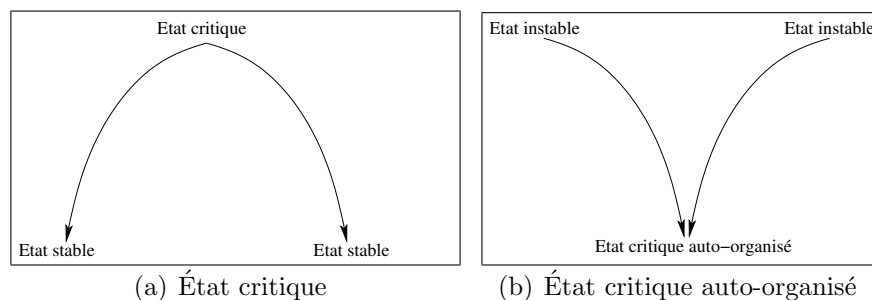


FIG. 1.10 – Criticalité auto-organisée

Ainsi donc, la larve du fourmilion a compris depuis longtemps cette notion de criticalité auto-organisée et l'utilise. Le piège est dans un état critique auto-organisé, une perturbation par l'intermédiaire d'une proie se produit, l'avalanche se déclenche et le piège se retrouve à nouveau dans un état critique auto-organisé prêt à nouveau à fonctionner !

1.3.3 Vers une utilisation de la métaphore

Par rapport aux objectifs que nous avons fixés au début de notre propos, nous avons donc tenté de comprendre et d'expliquer le fonctionnement et l'organisation d'un système vivant en proposant un modèle et en mettant en œuvre une simulation. Ici se pose le problème de l'informatique bio-inspirée : le modèle du vivant obtenu et les artefacts informatiques sont-ils transposables de façon générique à d'autres problèmes ?

Nous ne développerons ici que très brièvement ce point puisqu'il va constituer l'un des fils conducteurs de ce mémoire, mais constatons néanmoins que le modèle utilisé pour la simulation est un automate cellulaire⁷. Ceci s'inscrit parfaitement dans l'esprit de la science informatique dont l'un des apports est la modélisation des comportements. Notre modèle est simple et constitue un univers où on a fixé les règles d'interactions, on teste et analyse le comportement d'un univers simplifié, image imparfaite d'une réalité. On est bien là, face à un modèle qui représente les structures essentielles d'une réalité et qui est capable à son niveau d'en expliquer ou d'en reproduire dynamiquement le fonctionnement. Ceci dans le but en particulier de comprendre cette réalité, de la connaître, de savoir ce qu'elle est, de prévoir son comportement et évidemment de transmettre cette connaissance. Les automates cellulaires sont utilisés dans de nombreuses applications de domaines différents. Sans être aucunement exhaustif, pour plus d'informations on pourra lire par exemple [Ganguly et al., 2003], citons néanmoins :

- Modélisation de systèmes physiques ou biologiques. C'est souvent une alternative aux équations différentielles comme dans le cas des équations de Navier-Stokes [Rothman and Zaleski, 1994] mais aussi également dans les problèmes épidémiologiques [Zorzenon dos Santos and Coutinho, 2001].
- L'analyse de dynamiques urbaines, de trafic routier [Simon and Nagel, 1998], de feux de forêts, ...

Notre fourmilion entretient donc un état critique auto-organisé pour mieux piéger ses futures proies, pouvons nous rapprocher cela à d'autres problèmes ou nous en inspirer ?

Les idées qui viennent à l'esprit sont immédiatement les problèmes d'embouteillage [Paczuski and Nagel, 1996] ou même les mécanismes économiques, mais il existe de nombreux autres exemples dans lesquels les protagonistes ont une rationalité et des pouvoirs d'action limités. La nature semble opérer dans certains cas selon des processus critiques auto-organisés, et on a vu dans le cas de notre larve que cela présentait un certain nombre d'avantages indéniables. Peut on dans certains cas, concevoir des artefacts informatiques possédant cette propriété ?

Les systèmes multi-agents sont un domaine fécond pour cela [Marcenac, 1998] même si c'est souvent l'auto-organisation seule qui est considérée [Serugendo et al., 2006]. Mais on peut également s'orienter, à un plus bas niveau, vers l'informatique distribuée en considérant la gestion d'un système distribué constitué de ce que nous appellerons des ressources de calcul. Le but est alors de faire bénéficier aux applications/processus/tâches/agents⁸... , pleinement de la puissance de calcul disponible, et principalement des ressources de calcul inactives ou peu chargées. L'objectif, le plus couramment poursuivi est l'amélioration des performances globales du système et des applications. Le système peut être vu comme un système critique auto-organisé.

Pour cela on peut imaginer un système distribué organisé en réseau régulier ou non

⁷Il est évident que nous ne prétendons pas que le problème du fourmilion est la source d'inspiration des automates cellulaires. Ils existaient bien avant notre exemple.

⁸On retiendra processus pour la suite de notre propos.

où chaque ressource à des voisins et les connaît. Chaque processus coûte $c \in [1..n]$ et dure $t \in [1..p]$. Donc si un nouveau processus de coût c apparaît sur une ressource pouvant supporter cette nouvelle charge, il est traité. Sinon il est envoyé à l'un de ses voisins ou il est éventuellement traité sur la ressource sur laquelle il est apparu, mais alors un ou plusieurs autres processus sont envoyés à un ou plusieurs voisins afin de ne pas surcharger la ressource. Lorsque l'ensemble du réseau est à la limite de ses capacités il est dans un état critique, de même lorsqu'un sous réseau a atteint sa capacité nominale, une perturbation comme la création d'un nouveau processus va provoquer une avalanche dans ce sous-réseau qui peut éventuellement se propager. Les questions qui se posent sont comment gérer l'auto-organisation et la criticalité et faut-il comme le fourmilion éviter le processus d'accumulation en «supprimant» certains processus lorsqu'une ressource a par exemple épuisé ses voisins et/ou gérer le temps ?

Chapitre 2

Positionnement

Sommaire

2.1	Système	18
2.1.1	Système fermé - système ouvert	19
2.1.2	Système autonome - Système dissipatif - Système vivant	20
2.2	Complexité	22
2.2.1	Systèmes complexes	22
2.2.2	Organisation, structure et forme	24
2.2.3	Auto-organisation	26
2.3	Émergence	30
2.3.1	Causalité	32
2.3.2	Phénomènes émergents synchroniques et diachroniques	33
2.3.3	Types d'émergence	34
2.3.4	Mesure de la complexité	35
2.4	Typologie de l'émergence	37
2.4.1	Émergence simple	37
2.4.2	Émergence faible	38
2.4.3	Émergence forte	40
2.5	Intelligence collective	41
2.5.1	Interactions, auto-organisation et stigmergie	43
2.6	Conclusion	44

Nos travaux trouvent leur cadre conceptuel de base dans la théorie des systèmes [von Bertalanffy, 1973], la systémique [Wiener, 1948, de Rosnay, 1975] et le paradigme de système complexe [Le Moigne, 1990]. Nous allons donc détailler dans ce qui suit ce positionnement.

2.1 Système

Système est un terme couramment employé en sciences, son acception varie d'un domaine à l'autre et même d'un auteur à l'autre. Nous allons tenter d'en cerner le contour.

Ainsi [de Saussure, 1931] définit un système comme une «*Totalité organisée, faite d'éléments solidaires ne pouvant être définis que les uns par rapport aux autres en fonction de leur place dans cette totalité*». Cette définition d'un système nous semble particulièrement pertinente puisqu'elle met en avant le concept d'organisation en le liant à celui de totalité et d'interrelation/d'interaction. Autrement dit, les interactions entre entités, éléments, événements ou individus, dès lors qu'elles ont un caractère régulier ou stable, deviennent organisationnelles et constituent une matrice créatrice, attractive et éventuellement stable et durable. [Le Moigne, 1990] pour sa part propose : «*un système général est une intervention finalisante dans un environnement*», il introduit les notions d'action et d'environnement, certains comme [de Rosnay, 1975] ajoutent un aspect téléologique : «*un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisés en fonction d'un but*».

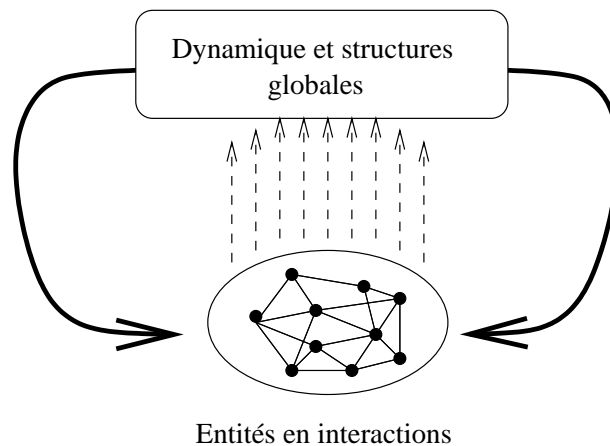


FIG. 2.1 – Vue schématique d'un système

De notre point de vue, un système (voir figure 2.1) est un ensemble constitutif formé d'entités en interactions mutuelles et en interaction avec un milieu extérieur ou environnement. Le système et ses constituants répondent aux trois propriétés holistiques irréductibles suivantes :

1. Dépendance interactive : les structures et les dynamiques des entités du système dépendent les unes des autres. Par conséquent, si on isole une entité on la modifie et si on agit sur certaines cela a des conséquences sur d'autres.

2. Existence ou émergence d'une entité globale : de l'ensemble des unités fonctionnelles et de l'ensemble de leurs interactions émerge une entité nouvelle montrant une structure, des propriétés et une dynamique nouvelles par rapport à celles de ses composantes. Cette entité globale interagit avec son environnement. «*Le tout est plus que la somme de partie*»⁹.
3. Phénomène de rétroaction de l'organisation globale sur ses parties constitutives : «*le tout est moins que la somme des parties*» [Morin, 1981, Morin, 1990].

2.1.1 Système fermé - système ouvert

Un système peut-être ouvert, fermé ou isolé cela en fonction des échanges qu'il a avec l'extérieur, cela caractérise donc les interactions qu'il peut avoir avec son environnement (voir figure 2.2).

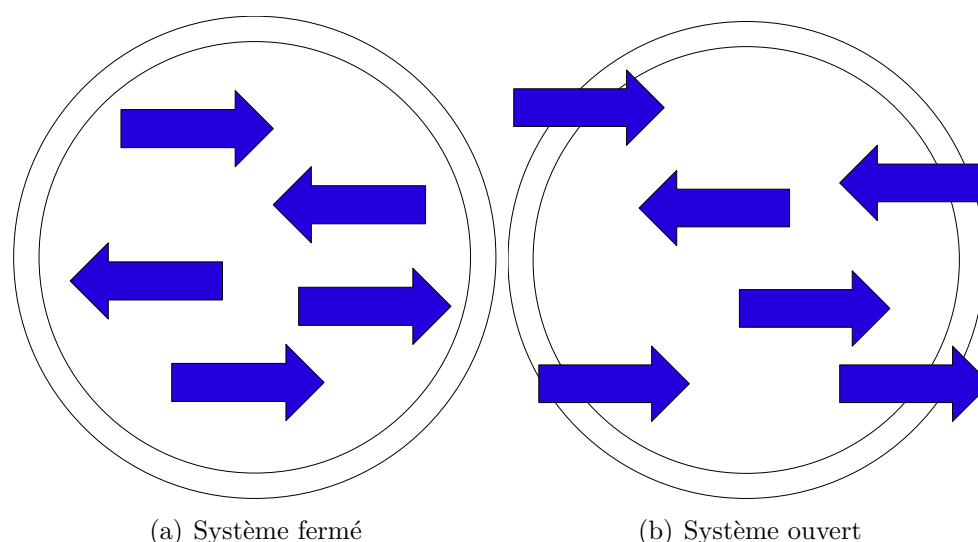


FIG. 2.2 – Système ouvert - système fermé
D'après [de Rosnay, 1975]

Un système isolé est complètement autonome et n'échange rien avec l'extérieur, c'est-à-dire ni matière, ni énergie. Dans la réalité, il n'existe pas de système isolé¹⁰. Un système fermé n'échange pas de matière avec l'extérieur à la différence d'un système ouvert, tout deux sont néanmoins traversés par des flux d'énergies. Ainsi, par exemple les systèmes thermodynamiques sont généralement fermés et les systèmes biologiques sont des systèmes ouverts et de ce fait ne respectent pas la deuxième loi de la thermodynamique, Shrödinger l'avait constaté dans [Shrödinger, 1944].

Les flux qui traversent les systèmes sont nécessaires à leur maintien et les structurent. Les systèmes peuvent stocker éventuellement une partie des apports de matière et/ou

⁹Aristote

¹⁰excepté l'univers pris dans son ensemble néanmoins la bouteille thermos en est une bonne approximation.

d'énergie, leur permettant parfois d'entretenir une stabilité dans le temps, néanmoins de petites perturbations peuvent conduire le système à se transformer, à s'organiser différemment, ou même à disparaître. De même, le système peut être plus ou moins sensible aux conditions initiales [Prigogine and Stengers, 1985, Prigogine, 1999]. La trajectoire d'un système se développe dans l'espace des phases constitués de tous les états possibles, certains états pouvant se comporter comme des attracteurs.

2.1.2 Système autonome - Système dissipatif - Système vivant

Un système est autonome s'il est opérationnellement clos [Maturana and Varela, 1994] c'est-à-dire si son organisation est caractérisée par des processus :

- Dépendant récursivement les uns des autres pour la génération et la réalisation des processus eux-mêmes ;
- Constituant le système comme une unité reconnaissable dans l'espace (le domaine) où les processus existent.

Remarquons que cette notion de clôture se distingue de celle de fermeture qui traduirait l'absence d'interaction avec l'environnement. Ces dernières dans le cadre d'un système autonome sont réalisées de façon à conserver sa structure (identité) et sa clôture.

Un système autonome présente donc à la fois des conditions de stabilité et de changement. Ilya Prigogine parle de système dissipatif [Prigogine and Stengers, 1985]. Ce sont, je cite : «*des flots d'ordre dans un océan de désordre*». L'évolution positive ou nulle de l'ordre est obtenue en dissipant le désordre dans l'environnement. Les tourbillons que nous présenterons 3.3 (cf. figure 2.3) sont des structures dissipatives, ils restent stables tant qu'ils sont alimentés par l'écoulement ou non perturbés de façon majeure. La stabilité est assurée par des forces externes au système : dans le cadre des systèmes vivants que nous allons définir dans ce qui suit, la stabilité provient de la dynamique interne.

Un système vivant est bien évidemment un système dissipatif, [Capra, 2003] dégage trois conditions nécessaires pour un système vivant :

- un modèle d'organisation : configuration des relations qui déterminent les caractéristiques essentielles du système ;
- une structure : matérialisation du modèle d'organisation ;
- un processus : activité qui permet au modèle de se matérialiser dans la structure.

Ce ne sont que des conditions nécessaires, elles ne suffisent pas pour caractériser un système vivant, il faut y ajouter, au moins ¹¹, l'hypothèse de l'autopoïèse [Maturana, 1981]

¹¹La notion de vivant est dans les faits très difficile à définir, néanmoins un être vivant suit trois grands principes : phylogénétique, ontogénétique et épigénétique. Phylogénétique : le matériel génétique peut se transformer et donner naissance à des descendants différents. Ontogénétique : capacité de croître par division et différenciation cellulaire à partir d'une cellule souche. Épigenétique : en un mot, nous n'héritons pas seulement de nos gènes (de l'ADN), des caractères acquis sous l'influence de l'environnement se transmettent eux aussi. Les modifications transmissibles et réversibles portent sur l'expression des gènes. [Bedau, 1996] considère comme vivant les systèmes capables d'une "évolution ouverte". C'est l'espèce et non l'individu qui évolue, c'est donc l'espèce qui est vivante au sens premier, l'individu ne l'est que par rapport à son appartenance à l'espèce. Nous ne sommes donc vivants que parce que nous appartenons à une espèce vivante.

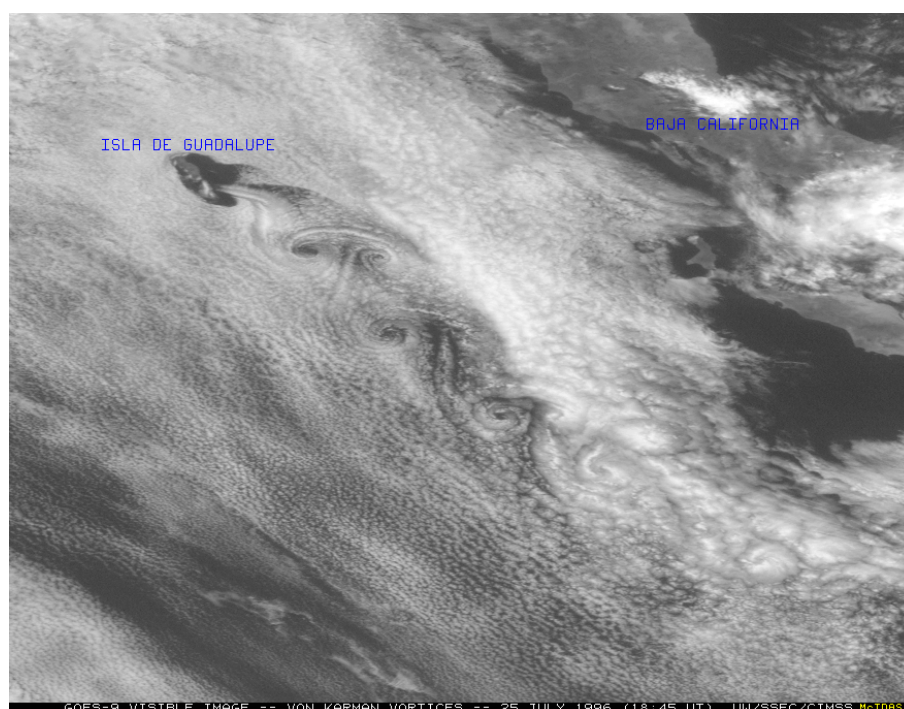


FIG. 2.3 – Allée de Von Karman

Source NASA, http://disc.gsfc.nasa.gov/oceancolor/scifocus/oceanColor/vonKarman_vortices.shtml

ou le modèle d'organisation d'un système vivant. Chaque composant a pour fonction de participer à la production ou la transformation des autres composants du réseau, ils s'auto-produisent de façon continue. De plus, certains des composants constituent la clôture opérationnelle formant une frontière qui circonscrit le système, définissant le «quant-à-soi», tout en participant à son auto-production. Les rapports dynamiques d'un système vivant avec son environnement constituent son couplage structurel.

Un système vivant est tout à la fois fermé et ouvert, clos sur le plan de l'organisation, ouvert par rapport à l'environnement. Le flux d'énergie et de matière est essentiel au maintien de l'organisation et à la régénération continue de la structure. Ainsi ce qui dure c'est le modèle d'organisation, par contre sa matérialisation n'a qu'une durée de vie très limitée.

Notre définition d'un système vivant est donc un système autopoïétique dissipatif, dont la vie est l'une des propriétés émergentes.

Terminons sur l'exemple de la cellule qui est sans conteste un système vivant. Elle présente un ensemble de composants, les nutriments, les organelles et le noyau, qui matérialisent sa structure. Au sein d'une cellule, de multiples molécules interagissent perpétuellement. Toutes ces molécules participent à des réactions biochimiques, transformant des molécules en d'autres molécules ou construisant des édifices moléculaires plus vastes. Ces interactions se font suivant le modèle d'organisation et le métabolisme cellulaire constitue le processus. La membrane effectue la clôture et participe aux interactions au même titre que les autres composants et contribue à la production de la cellule toute entière.

2.2 Complexité

Complexité¹², le mot est lâché et il est parfois mis à l'index par des auteurs comme John Horgan [Horgan, 1996] qui n'hésitent pas à parler de «bouillie chaoplexologiste», le trait est sévère cependant force est de constater que de nombreuses définitions de la complexité existent et qu'elle n'offre pas un paradigme unifié [Morel and Ramanujam, 1999]. Qu'on en juge, elle est utilisée comme une mesure d'information d'entropie ou de calculabilité, mais encore il peut s'agir de complexité statique, dynamique, naturelle. . . . Il se dégage néanmoins deux grandes catégories, la complexité aléatoire [Kolmogorov, 1965] et la complexité organisationnelle, c'est à cette dernière que nous nous intéresserons plus particulièrement dans la suite de ce document.

Si la complexité [Pour la science, 2004] traverse maintenant les travaux de nombreux scientifiques c'est Von Bertalanffy (thèse de 1928) [von Bertalanffy, 1975] qui a initié ce thème. Il a été poursuivi de manière diverse par Wiener (1948) [Wiener, 1948] et la cybernétique ou encore par Von Neumann (1966) [Neumann, 1966] et les premiers automates cellulaires. Il a ensuite fallu attendre 1980 et Prigogine [Prigogine, 1980] pour que la complexité connaisse un regain d'intérêt. C'est enfin l'école du *Santa Fe Institute* [Santa Fe Institute, 2006] qui fait aujourd'hui figure de référence.

La complexité d'un système est avant tout une propriété combinée du système et de son interaction avec d'autres systèmes, l'observateur (au sens large) pouvant constituer un de ces autres systèmes. C'est le langage, notre culture qui crée notre réalité. En d'autres termes la science ne décrit pas la chose réelle mais uniquement une somme de connaissances acquises. On l'aura compris, l'observateur et sa technique d'observation sont au centre du concept, il y aura émergence ou pas de propriétés nouvelles suivant ce qui est mesuré, suivi, regardé La complexité est donc subjective, elle est dépendante de l'observation, de sa description et nous retrouverons ce même problème lorsque nous aborderons le problème de l'émergence.

S'il est difficile de définir la complexité, il est plus facile d'énumérer des cas où il n'y a pas complexité :

- Centralisation ;
- Nombre limité d'interactions et de boucles de rétroaction et/ou pro-action ;
- Décomposition possible, compliqué n'est pas complexe ;
- Comportement prévisible.

2.2.1 Systèmes complexes

Un système complexe se caractérise par de nombreuses entités de même nature ou différentes qui interagissent de façon non triviale (non linéaire, boucle de rétroactions ...) et par l'émergence au niveau global de propriétés nouvelles, non observables au niveau des entités de base. Un système complexe a un comportement holistique. La dynamique de fonctionnement global est difficilement prévisible à partir de l'analyse et l'observation des interactions de base autrement dit le comportement est très difficilement modélisable

¹²[Casti, 1994] Dialogue entre deux savants : «La complexité, c'est ce que vous ne comprenez pas», dit le premier, «Vous ne comprenez pas la complexité» dit le second.

par les méthodes analytiques classiques. Le comportement holistique interdit toute analyse descendante qui décomposerait le système en sous-systèmes et ceci jusqu'à les rendre intelligibles. On abandonne donc le cartésianisme ¹³ au profit de l'«aristotélisme»¹⁴. Les propriétés globales qui émergent sont sans doute le résultat de la richesse des interactions qui créent des organisations. Il s'agit d'auto-organisation et cette capacité (d'organisation) conduit les systèmes complexes les plus évolués à être adaptatifs. En effet, si on les considère comme des systèmes ouverts ces systèmes s'adaptent aux événements extérieurs. Il y a rétroaction de l'organisation globale sur ses parties constitutives.¹⁵

Le champ d'application de la théorie des systèmes complexes est vaste et ouvert, sans être exhaustif nous pouvons citer :

- La physique et les problèmes de percolation, la physique des particules ...
- La biologie et les systèmes immunitaires, les systèmes écologiques, les sociétés d'insectes, la synthèse des protéines ...
- Les sciences cognitives et sociales et d'une façon plus générale les sciences de l'homme ;
- ...

Concernant les systèmes complexes Arthur, Durlauf et Lane [Arthur et al., 1997] énumèrent six propriétés :

1. Il existe un grand nombre d'entités hétérogènes qui interagissent uniquement avec un certain nombre d'autres (interactions dispersées) ;
2. Il n'y a pas de centralisme ;
3. Il existe des organisations hiérarchiques transversales avec un grand nombre d'interactions enchevêtrées ;
4. Les entités peuvent s'adapter, apprendre et donc évoluer ;
5. Le système évolue en permanence avec l'apparition et la disparition d'organisations ;
6. Le système n'est jamais à l'optimum global, la dynamique est toujours hors de l'équilibre (il n'existe pas d'équilibre ou on passe d'un équilibre à un autre) .

De ces propriétés se dégagent deux orientations (fig. 2.4) la complexité organisationnelle (points 1 et 3) ou encore connexionniste et la complexité phénoménologique (point 6).

[Schwarz, 1994] considère sept types de processus conduisant à de la complexité et permettant de classer les systèmes par niveau de complexité :

- Accroissement d'entropie : processus d'évolution associé aux systèmes dissipatifs ;
- Création de forme : morphogénèse associée aux systèmes auto-organisés ;
- Recyclage de la matière : cycles associés aux systèmes auto-organisés ;
- Boucles de rétroaction : homéostasie associée aux systèmes auto-régulés ;
- Autoproduction des constituants du système à partir du réseau de relations : auto-poïèse associée aux systèmes vivants ;

¹³«Le second (précepte) de diviser chacune des difficultés que j'examinerais, en autant de parcelles qu'il se pourrait, et qu'il serait requis pour les mieux résoudre. Le troisième, de conduire par ordre mes pensées, en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter, peu à peu, comme par degrés, jusqu'à la connaissance des plus composés" ... **Descartes**, *Discours de la méthode*.

¹⁴«Le tout est plus que la somme de ses parties." **Aristote** *op.cit.*

¹⁵« Le tout est moins que la somme des parties". **E. Morin** *op.cit.*

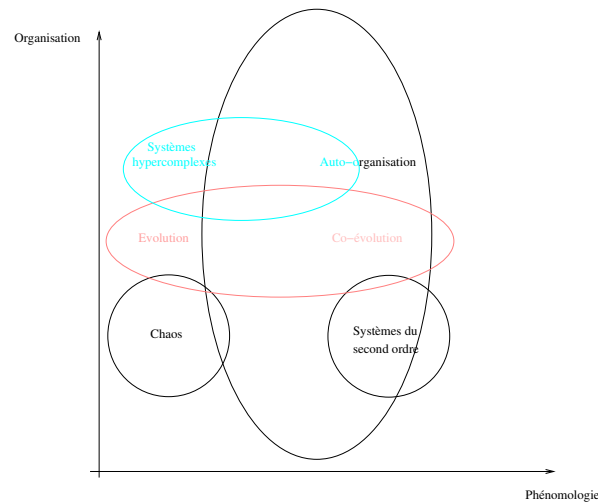


FIG. 2.4 – Complexité organisationnelle et phénoménologique

- Appréhension du niveau de conscience et référence à une image de soi : autoréférence associée aux systèmes auto-connaissants ;
- Création d'existant par l'existant : autogénèse associés aux systèmes en voie d'autonomisation.

L'étude des systèmes complexes passe le plus souvent par des simulations. On décrit alors le système en se plaçant au niveau de ses constituants et de leurs interactions, la simulation à base d'agents en est un des outils. On simule donc le fonctionnement et on tente d'optimiser différents paramètres afin d'obtenir un comportement global satisfaisant. On pourra remarquer que l'on s'éloigne de la vision traditionnelle de l'informatique qui consiste à fournir des données en entrée et attendre des données en sortie qui traduisent la trajectoire du problème étudié. Ici ce n'est plus le résultat mais le comportement de la simulation qui est central, l'observateur y a une place importante. Tout comme dans les écosystèmes on peut voir dans les simulations trois phases, une phase juvénile, mature et enfin sénescence. Ces phases apparaissent en fonction de l'auto-organisation du système simulé. La phase juvénile est une phase de croissance instable durant laquelle les organisations apparaissent. Lorsque le processus devient stable la phase mature est atteinte, l'auto-organisation exerce sa prégnance. La dernière phase est le résultat soit d'une déstabilisation du système qui voit ses organisations disparaître ou la prééminence d'organisations qui font disparaître les moins stables, le système s'engage dans une voie de simplification au dépend souvent de la robustesse.

2.2.2 Organisation, structure et forme

Il est difficile de définir le terme organisation car plusieurs types d'organisations peuvent être présents dans un même système, en fonction des besoins et de l'observateur et/ou de leurs actions. Néanmoins deux types se dégagent :

- les organisations définies uniquement par l'observateur ;

- les organisations qui en tant que telles rétroagissent sur le système dont elles font partie.

Le premier type se scinde en deux. Une première forme d'organisation est de type hiérarchique, comme par exemple une entreprise. Ce type d'organisation est plutôt statique. Ces organisations sont créées par un ou plusieurs «décideurs» qui gèrent centralement la forme de l'organisation.

Une seconde forme d'organisation est constituée par les groupes formés au sein d'un ensemble d'entités par un observateur extérieur¹⁶. De tels groupes sont arbitraires et dépendent des besoins et des attentes de l'observateur. Il s'agit de séparations suivant un critère particulier d'un ensemble d'éléments, par exemple suivant une relation d'ordre, ou en fonction d'un critère de ressemblance, de sémantique, d'éloignement ou de rapprochement, Ce critère de séparation définit les frontières des organisations suivant une notion d'ordre.

Le second type d'organisation concerne celles qui peuvent non seulement être observées mais agissent en tant que tout sur le système dont elles font partie. Cette action est une rétroaction qui elle-même peut entraîner la définition de plus en plus précise de l'organisation. En d'autres termes, elle peut entraîner la formation d'une frontière, ou même d'une forme, délimitant l'organisation, et par là même une notion d'appartenance, donc de critère de sélection. On peut citer l'exemple des cellules au sein du corps humain, mais aussi de groupes sociaux humains qui lorsqu'ils atteignent une masse critique prennent conscience d'eux-mêmes en tant que groupe, en s'identifiant.

La notion de structure, quant à elle, est beaucoup plus statique par rapport à celle de l'organisation. Elle correspond à l'ensemble des interrelations, interactions ou tout autre forme de liens présents dans le système. Alors qu'une organisation possède un potentiel exprimé ou non en fonction des sollicitations internes ou externes, la structure trace les contours d'une forme¹⁷ par l'intermédiaire des dépendances qu'elle regroupe.

La forme s'inscrit dans un espace, elle correspond à une perception et offre une représentation spatiale à la fois de l'organisation et de la structure (cf. figure 2.5(b)). La forme est porteuse de sens et on rejoint en cela la Gestalt [Rosenthal and Visetti, 1999], même si cette théorie s'est développée, tout d'abord, dans le cadre de la perception cognitive et plus particulièrement la psychologie de la forme. C'est aussi maintenant, et même d'abord, une théorie générale des formes et des organisations. Il n'est donc pas surprenant qu'elle

¹⁶Il est donc possible de trouver de telles organisations au sein d'une organisation hiérarchique.

¹⁷« Donnons la parole à [Merleau-Ponty, 1942] : »*La notion de forme qui nous a été imposée par les faits se définissait comme celle d'un système physique, c'est-à-dire d'un ensemble de forces en état d'équilibre ou de changement constant, tel qu'aucune loi ne soit formulable pour chaque partie prise à part et que chaque vecteur représentant mathématiquement de tel ou tel paramètre local soit déterminé en grandeur et en direction par tous les autres. Chaque changement local se traduira donc dans une forme par une redistribution des forces qui assure la constance de leur rapport, c'est cette circulation intérieure qui est le système comme réalité physique, et il n'est pas plus composé des parties qu'on peut y distinguer que la mélodie, toujours transposable, n'est faite des notes qui en sont l'expression momentanée. Unité intérieure inscrite dans un segment d'espace, et résistant, par sa causalité circulaire, à la déformation des influences externes, la forme physique est un individu [...]. Chaque forme constitue un champ de forces caractérisé par une loi qui n'a pas de sens hors des limites de la structure dynamique considérée, et qui par contre assigne à chaque point intérieur ses propriétés, si bien qu'elles ne seront jamais des propriétés absolues, des propriétés de ce point*».

s'invite dans nos travaux qui s'intéressent aux notions de formes, structures et organisations. C'est l'un des intermédiaires que nous utilisons pour «com-prendre» autrement dit prendre ensemble.

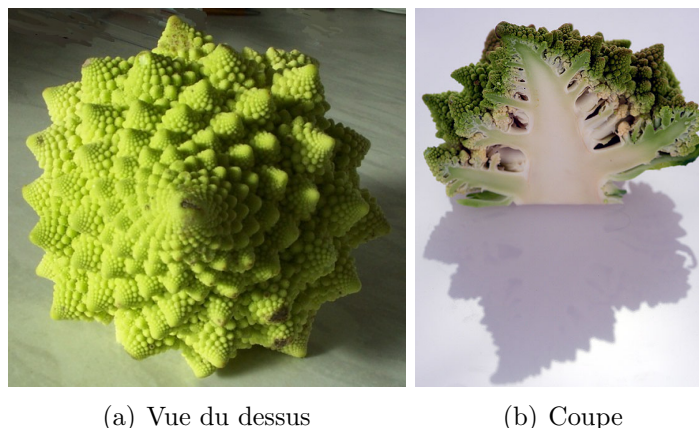


FIG. 2.5 – Choux romaneco montrant une forme et une organisation fractale

La forme crée une continuité, cette continuité met en évidence le destin commun d'un groupe d'entités élément de la forme, elles co-évoluent.

2.2.3 Auto-organisation

L'organisation lie donc de façon interrelationnelle des éléments, des événements ou des individus qui deviennent les composants d'un tout. Elle assume solidarité et solidité relative à ces liaisons, et assure au système une certaine possibilité de durée en dépit de perturbations aléatoires. L'organisation donc : transforme, produit, relie, maintient. Edgar Morin dans [Morin, 1981] propose d'ailleurs le néologisme *organisaction* pour bien montrer le caractère actif. L'organisation peut être issue du système lui-même et donc exhiber les caractéristiques de l'auto-organisation qui correspond à l'aptitude d'un système à «s'instituer» ou à «s'auto-constituer» en produisant ses propres principes d'organisaction de façon ininterrompue. Matura et Varela vont plus loin encore en parlant d'auto-poïèse¹⁸, qu'ils considèrent comme la capacité ou l'aptitude qu'a un système vivant de s'auto-produire de façon permanente, de créer constamment et sans discontinuer ses conditions d'existence. Les produits de l'organisation et du fonctionnement de l'être poïétique sont ceux-là mêmes qui produisent son organisation et son fonctionnement. L'auto-poïèse ou réorganisation permanente est une catégorie applicable à tout l'ordre biologique, et, par extension, à l'ordre social humain.

Deux logiques existent dans le cas de l'auto-organisation. Pour la première un système présentant des mécanismes d'auto-organisation est organisationnellement clos, les règles d'organisation sont internes au système. Pour la seconde il existe des points de vue

¹⁸La poïésis, d'après Platon est «une cause qui, quelle que soit la chose considérée, fait passer celle-ci du non-être à l'être»

extérieurs au système celui, par exemple, de l'observateur qui étudie ce système. Remarquons que ces deux logiques se retrouvent, également, dans les différentes définitions de l'émergence. À notre avis, ces deux logiques ne s'affrontent, ni ne s'opposent.

La première thèse s'applique aux systèmes vivants, la vie c'est le maintien de l'intégrité du système considéré. La perception cognitive du système est alors l'ensemble des relations compatibles avec la conservation de l'identité, c'est à dire celle de la clôture organisationnelle. Cela signifie que pour un système vivant, il n'existe pas d'intérieur ou d'extérieur, nous reviendrons d'ailleurs sur ce point lorsque nous aborderons le système immunitaire (cf. 5.3) en contestant la théorie du soi et du non-soi. Ce que le système perçoit c'est sa propre dynamique. La vision repose sur l'autonomie du système.

La deuxième thèse intègre un niveau extérieur au système considéré, une organisation est vue comme apportant de l'ordre, de la régularité, de la stabilité ... L'ordre et ses variations sont considérés du point de vue du domaine de description du niveau extérieur, ce niveau pouvant être celui d'un niveau plus intégrateur, micro vers macro, par exemple. Cette deuxième interprétation est orientée vers le contrôle puisque l'on peut imaginer le niveau extérieur influençant ou contrôlant le système par le biais des organisations. On comprend ainsi tout l'intérêt que cela présente au niveau des systèmes artificiels.

Ces deux points de vue sont en fait complémentaires, ainsi le domaine cognitif d'un système vivant est fixé par sa clôture organisationnelle. L'organisation est fixée et contrôlée à l'intérieur des frontières dans un processus d'auto-organisation. Par contre l'évolution est le résultat d'un phénomène de dérive structurale à l'intérieur du processus, ceci garantit la conservation de la clôture cognitive de l'unité en interaction, mais autorise le contrôle par tout ce qui favorise ou limite la dérive. Tout système vivant est autonome, mais est le résultat de l'évolution.

La détection des *organisations* constitue donc un des point central de mon travail et j'aurai du appeler ce mémoire : «Modélisation informatique de systèmes à base d'interactions, et détection d'ORGANISATIONS, modèles du vivant». Mes travaux s'inscrivent dans la logique que nous venons de décrire. On tente de détecter les organisations, afin soit de les réifier et de les réintroduire dans certain cas dans la simulation dans une démarche de changement d'échelle, par exemple, ou encore afin de faciliter leur maintien, favoriser ou limiter leur développement et même contribuer à leur apparition.

Mécanismes de l'auto-organisation

Mais comment les organisations et les formes apparaissent-elles? Cela est du aux interactions très nombreuses se produisant au sein du système. Ces interactions se font entre les entités elles-mêmes, mais aussi avec l'environnement. On peut distinguer quatre facteurs fondamentaux :

- des rétroactions positives;
- des rétroactions négatives;
- la présence d'un nombre critique d'entités en interaction;
- l'amplification des fluctuations.

On parle ainsi de rétroaction positive lorsqu'en réponse à une modification d'un paramètre d'un système, le système «répond» en changeant ce paramètre à nouveau *dans le même sens*. C'est le cas par exemple, si en réponse à l'augmentation de la taille d'une

organisation, cette organisation grandit encore plus. On considère généralement les rétroactions positives comme un mécanisme «explosif» dans le sens où si rien ne le stoppe, le phénomène s'amplifie continuellement.

Un exemple simple de rétroaction positive peut être donné en sociologie : plus un groupe social est gros, plus il devient attractif ou puissant, et plus il attire d'individus en son sein. On le voit cependant, s'il n'est pas contrôlé, ce processus mène à l'explosion du groupe qui devient trop important.

Quant aux rétroactions négatives, comme leur nom l'indique, elles prennent le contre-pied des rétroactions positives. On parle de rétroaction négative lorsqu'en réponse à un changement d'un paramètre du système, le système répond en changeant ce paramètre dans le sens contraire. Les rétroactions négatives ont un effet stabilisateur, elles maintiennent les structures et organisations créées par rétroactions positives. Les termes «négatif» et «positif» ne doivent pas être compris dans l'acception «bénéfique» et «néfaste», simplement une rétroaction négative stabilise, et une rétroaction positive amplifie le phénomène.

L'exemple le plus simple et connu de régulation par rétroaction est le thermostat. On va cependant l'éviter en prenant un exemple du vivant : la régulation physiologique de l'axe gonadotrope. Chez le mâle, le maintien de la concentration de la testostérone est indispensable à l'entretien des caractères sexuels et au déroulement de la spermatogenèse. La testostérone est sécrétée par les cellules (Cellule de Leydig) du tissu interstitielles des testicules, situées entre les tubes séminifères. La concentration plasmatique de testostérone résulte d'un équilibre dynamique entre sécrétion continue d'une part, dégradation puis excrétion d'autre part.

La production de testostérone est régulée par une chaîne complexe de signaux (voir figure 2.6), désignée axe hypothalamo-hypophyso-gonadique. La sécrétion de la gonadolibérine (GnRH) par l'hypothalamus se fait de façon pulsatile et cette hormone atteint l'adénohypophyse par le système porte hypophysaire. L'adénohypophyse libère alors l'hormone lutéinisante (LH) laquelle stimule, en retour, la production de testostérone par les cellules interstitielles des testicules. La production de testostérone est contrôlée par une boucle de rétroaction négative. Des taux de testostérone supérieurs à la normale dans la circulation inhibe la sécrétion de GnRH par l'hypothalamus, ce qui a pour effet de réduire la sécrétion de LH et d'abaisser les taux de testostérone. La rétroaction négative de la testostérone sur le complexe hypothalamo-hypophysaire permet donc de maintenir constant la testostéronémie.

On parle de morphogénèse lorsque les rétroactions positives amplifient la création d'un groupe, d'une structure ou d'une organisation, en un mot d'une forme, morphogénèse signifiant littéralement création de forme. On parle aussi de processus auto-catalytique en référence à la physique.

On parle de morphostase lorsque le processus de morphogénèse est contrôlé par des rétroactions négatives qui le ramènent sans cesse vers l'équilibre, limitant les amplifications, morphostase signifiant conservation de forme.

Ainsi, si les rétroactions positives créent des organisations et ont un facteur générateur nommé morphogénèse, les rétroactions négatives les maintiennent dans une «forme stable» en tant que telle nommée morphostase. Cependant, des interactions extérieures (environnement, autres organisations) peuvent à tout moment déstabiliser les organisa-

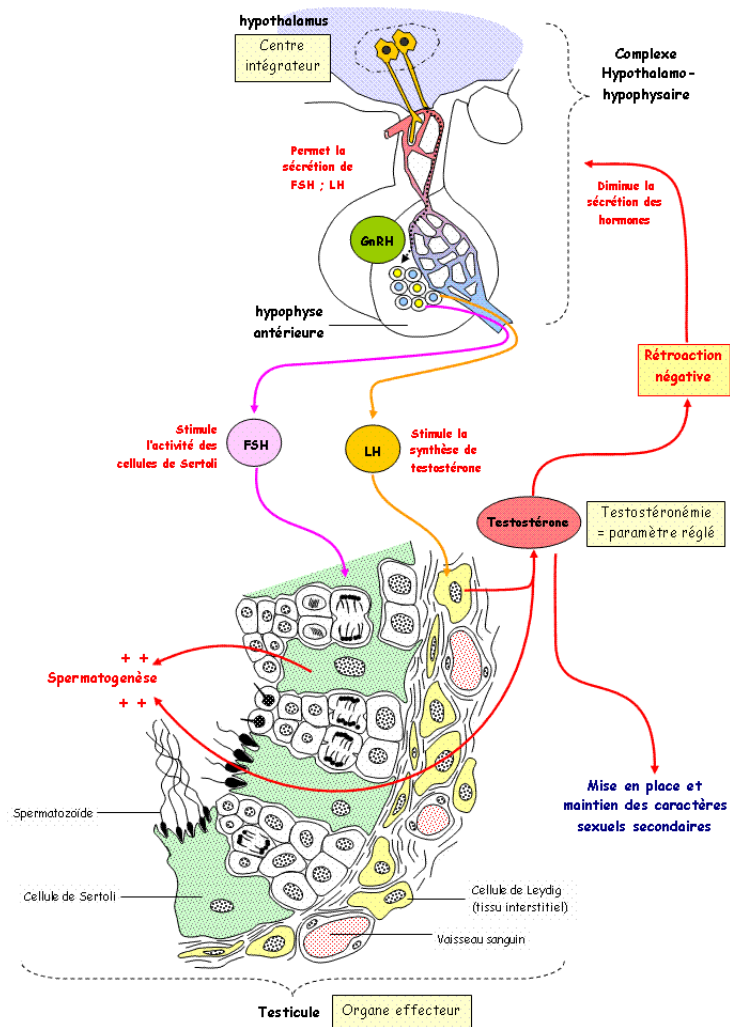


FIG. 2.6 – Régulation de la fonction de reproduction chez l'homme

tions de telle façon que :

- les rétroactions positives font exploser l'organisation ;
- les rétroactions négatives font disparaître l'organisation ;
- un facteur extérieur essentiel n'est plus disponible, faisant disparaître l'organisation.

L'auto-organisation crée donc des formes qui se développent en trois phases :

1. La phase juvénile, dans laquelle les interactions positives sont plus fortes, où les interactions négatives n'ont pas lieu, car aucun seuil de déclenchement n'a été rencontré. C'est la morphogénèse, l'apparition de la forme.
2. La phase adulte, dans laquelle les interactions positives et négatives jouent de concert, maintenant implicitement la forme en état. C'est la morphostase.
3. La phase sénescence, dans laquelle un facteur déstabilisant détruit la forme.

Les rétroactions négatives et positives, bien que nécessaires à l'auto-organisation, et en étant en quelque sorte la signature, ne sont pas forcément signe d'auto-organisation. Il est bien entendu possible d'observer des systèmes dans lesquels il y a ces deux formes de

rétroactions sans pour autant qu'il y ait auto-organisation (le thermostat, la régulation en automatique). En effet, d'autres critères sont essentiels : un nombre critique d'entités en interaction et la capacité de créer ses propres boucles homéostatiques.

Les systèmes présentant des caractéristiques d'auto-organisation sont régulés par un cycle quatre phases (voir figure 2.7) :

1. Une phase de dérive tropique due aux flux d'énergie, de matière et d'information provenant de l'environnement. Si ces flux entretiennent le système, ils peuvent également le déstabiliser, le désorganiser et être à l'origine de rupture du comportement.
2. L'aléa, le hasard, le système dévie de sa trajectoire, un point de bifurcation apparaît du aux tensions provoqués par la phase précédente. Si le système est soumis principalement aux rétroactions positives, il régresse ou même disparaît, il peut revenir à l'état initial, ou encore atteindre la phase suivante.
3. C'est une phase de transformation importante, de métamorphose, elle est le résultat soit d'une adaptation au contexte, soit une morphogénèse résultat de l'auto-organisation. Le système a atteint un nouveau stade d'organisation.
4. C'est le retour à la stabilité, des boucles de régulation homéostatiques sont à nouveau en place et assure la stabilité de l'état du système jusqu'à une prochaine dérive tropique conduisant à une bifurcation

Les modèles qu'ils faut donc développer doivent être basés sur les conséquences globales des interactions des éléments qui les constituent, et on peut alors suivre dans le modèle l'évolution de ces éléments. Cette caractéristique donne un certain pouvoir d'expression à ces modèles [Cardon, 2005].

2.3 Émergence

Pour essayer de cerner le concept d'émergence ce n'est pas l'absence de définition qui pose un problème mais plutôt l'abondance qui finit par rendre le mot polysémique. Les définitions se rapportent au domaine mais également à l'école scientifique de son auteur. [Deguet et al., 2005] montrent que plusieurs milliers d'articles scientifiques mentionnent le mot clef «émergence».

S'il faut rechercher l'origine du concept en philosophie, c'est sans doute à Galen¹⁹ [Caston, 1997] à qui il faut en attribuer la paternité, néanmoins c'est le courant émergentiste britannique créé, fin XIX^{ème} début XX^{ème} siècle, qui en a fixé les bases. [Mill, 1843, Broad, 1925] définissent l'émergence comme l'apparition, à travers l'évolution du monde, de propriétés d'un certain niveau à partir de propriétés du niveau précédent. Par exemple, les propriétés chimiques émergent des propriétés physiques des atomes. Le concept d'émergence a été repris et développé par le courant de pensée systémique [de Rosnay, 1975] avec la symbionomie²⁰ par exemple, et en intelligence artificielle distribuée [M. R. Jean, 1997]

¹⁹Claudius Galenus of Pergamum (129-200).

²⁰Étude de l'émergence des systèmes complexes par auto-organisation, autosélection, coévolution et symbiose.

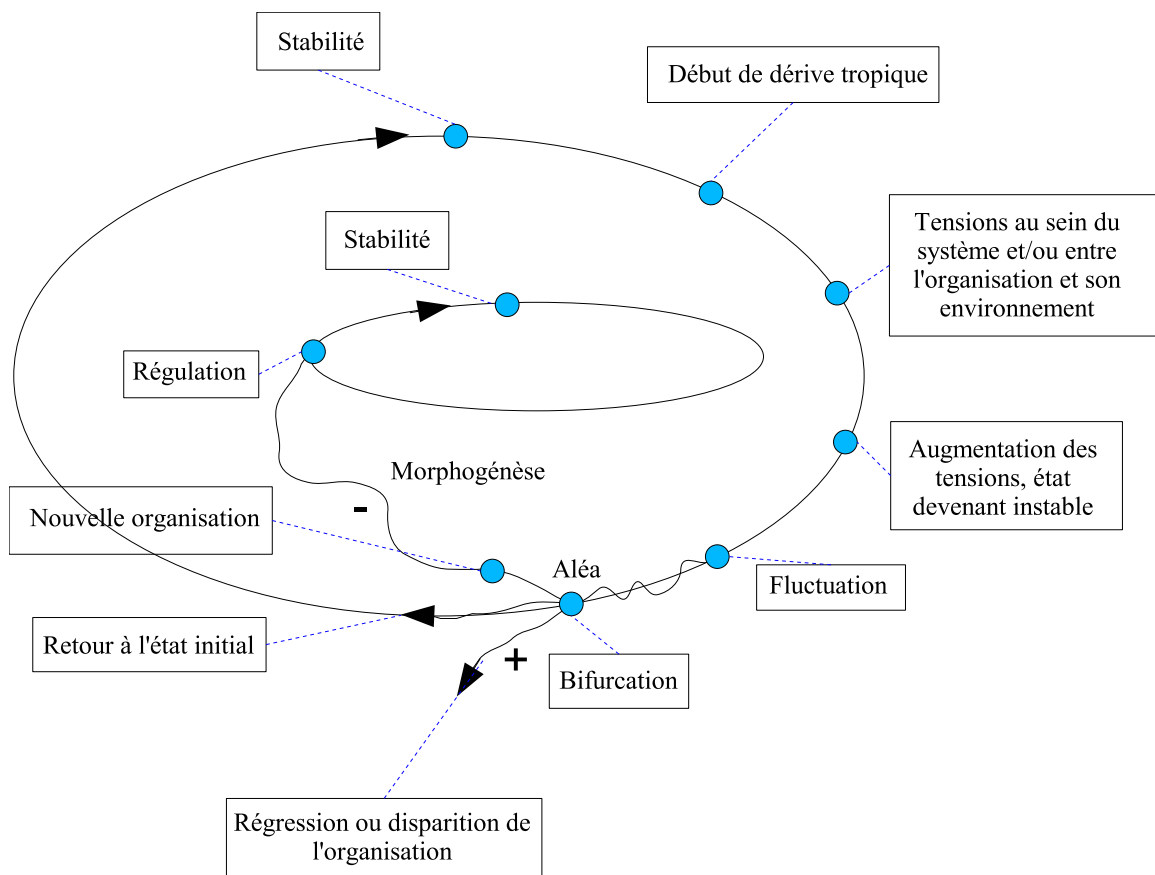


FIG. 2.7 – Dynamique de l'auto-organisation

avec en particulier l'étude des mécanismes d'émergence dans les systèmes multi-agents.

Les systèmes complexes et l'émergence amènent à s'interroger sur le principe de causalité.

2.3.1 Causalité

Qu'en est-il de la rationalité, dans le cadre de l'émergence et des systèmes complexes ? En effet, le principe de causalité nous dit que tout phénomène a une cause et que dans les mêmes conditions, la même cause est suivie du même effet. Face aux multiples boucles de rétroaction et à l'aléa la causalité peut sembler difficile à établir !

[Aristote, 2002] propose quatre causes :

- La cause matérielle - la matière de la chose - D'où provient elle et de quoi est-elle faite ?
- La cause formelle - la définition (la quiddité), la forme - Quelle est sa forme ou quel est le modèle imité ?
- La cause motrice (la cause efficiente) - le mouvement, la dynamique - Quel est le principe ou le mouvement qui lui a donné naissance ?
- La cause finale - la raison d'être, le rêve projeté - Dans quel but a-t-elle été faite ?

Des auteurs comme [Bedau, 2003, Emmeche et al., 2000] pensent que des propriétés émergentes ne respectant pas le principe de causalité ne sont que des épiphénomènes ²¹. Si l'on considère les quatre types aristotéliens traditionnels de causalité, dans le cadre de l'émergence, on peut proposer l'interprétation suivante :

- La causalité matérielle, qui exprime qu'une entité est composée d'autres entités ;
- La causalité formelle, qui se rapporte à la forme d'une entité ou d'un processus donné. Elle correspond à la structure, l'organisation ...
- La causalité efficiente, qui signifie que quelque chose implique, provoque ... Elle repose sur une chronologie et sous-entend un transfert d'énergie, d'information ou de matière.
- La causalité fonctionnelle qui se rapporte au rôle joué par une partie dans un tout, mais aussi au rôle d'un tout sur une ou plusieurs parties.

La causalité, dans ce contexte, ne peut être comprise que si l'on parle de la boucle de rétroaction qui devient récursive, c'est-à-dire une boucle causale où l'effet agit sur la cause et la remet de nouveau en action. La causalité y est à la fois ascendante et descendante (voir figure 2.8).

La causalité ascendante s'exprime par des phénomènes d'instabilité qui malgré un grand nombre d'entités d'un système, permettent à une ou quelques unes d'entre elles d'influencer un niveau plus global, alors que la causalité descendante intervient par exemple dans un processus de sélection.

²¹ «*emergent properties without causal power would be mere epiphenomena*» [Bedau, 2003]. Le problème de ce terme est qu'il est souvent utilisé dans des contresens.

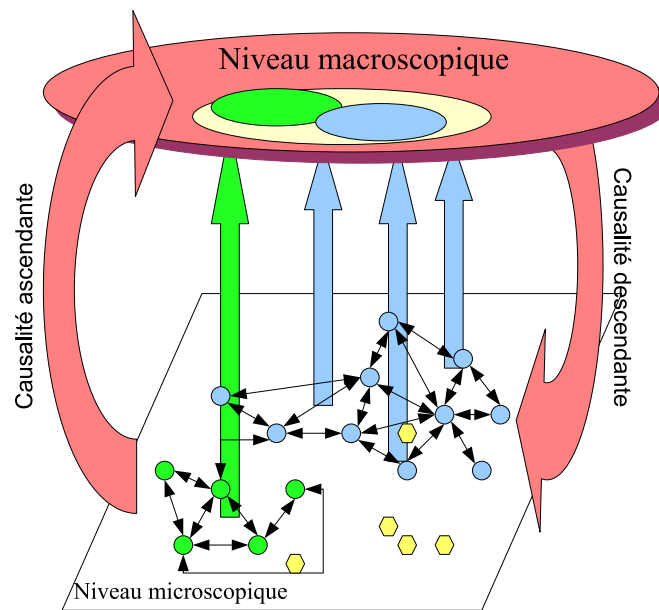


FIG. 2.8 – Causalité circulaire

2.3.2 Phénomènes émergents synchroniques et diachroniques

Pour étudier les transformations de tout système, il est nécessaire de prendre en compte le temps. Dans les systèmes dynamiques des échelles temporelles différentes, qui correspondent à des vitesses d'occurrence d'événements subit par le système, peuvent exister. Les variables ²² du système évoluent dans l'une des échelles et interagissent ou sont influencées par d'autres variables qui elles mêmes évoluent éventuellement dans une autre échelle de temps. La temporalité est de ce fait imbriquée. Dans un esprit de simplification, on considère souvent trois échelles, la première rapide, la seconde lente et enfin la dernière fixe. Les variables rapides correspondent généralement aux interactions quasi-instantanées présentes aux niveaux dits microscopiques, alors que les variables lentes sont associées aux niveaux macroscopiques engagés dans la voie de l'adaptation. Pour prendre un exemple, la pente du lit d'un fleuve crée l'écoulement qui s'effectue dans ce lit et le creuse.

Un phénomène émergent synchronique suppose que les niveaux microscopique et macroscopique soient présents simultanément. On considère que les échelles temporelles sont du même ordre, aussi bien, dans le sens causal ascendant que dans celui descendant. La boucle se fait autour d'un point d'équilibre, autrement dit en l'absence de perturbation, le processus semble présenter un état de stabilité, l'émergence ayant tendance à renforcer le phénomène. Un processus d'émergence synchronique s'inscrit dans l'instant.

Le phénomène émergent diachronique explique la genèse et l'évolution du processus [Kim, 1999]. Il met en évidence comment le niveau macroscopique est progressivement issu du niveau microscopique, autrement dit il suppose que l'émergence dans ce cadre est évolutionnairement explicable. Il correspond à un processus séquentiel d'adaptation entre les niveaux macroscopique et microscopique. Alors qu'un phénomène émergent synchronique

²²Nous avons retenu ce mot pour la suite de notre propos, dans le sens qui varie et/ou fait varier, il désigne aussi bien entités, organisations, grandeurs, paramètres ...

est le résultat des interactions instantanées entre les entités du niveau microscopique, un phénomène émergent diachronique s'exprime dans des temporalités différentes, à court terme dans le sens de la causalité ascendante, à long terme dans le sens de la causalité descendante. Cela génère, à court terme, des états transitoires et éventuellement, à long terme, des états (pseudo-)asymptotiques.

2.3.3 Types d'émergence

De nombreuses classifications existent dans la littérature, elles sont de diverses inspirations néanmoins un grand nombre d'entre elles prennent leurs sources en épistémologie.

Ainsi le dictionnaire de Philosophie de Cambridge [Audi, 1995], nous propose les deux types suivants :

- l'émergence descriptive ; il y a des propriétés du tout qui ne peuvent pas être définies à l'aide des propriétés des parties.
- l'émergence explicative ; les lois des situations les plus complexes dans le système ne sont déductibles d'aucune façon par composition des lois des situations les plus simples.

Ce type de classification différencie les structures/organisations donc la description, de l'explication constituée des lois/règles.

Cependant les deux classes que l'on rencontre le plus souvent dans la littérature, aussi bien en épistémologie, que dans les sciences utilisant une approche émergentiste sont : l'émergence forte [Chalmers, 1996] et l'émergence faible [Bedau, 1997]. Timothy O'Connor et Hong Yu Wong dans l'encyclopédie de philosophie de Stanford [Zalta, 2006] parlent d'émergence épistémologique²³ pour l'émergence faible et d'émergence ontologique²⁴ pour l'émergence forte.

Émergence forte

[Chalmers, 2002] nous dit ²⁵ qu'il y a émergence forte lorsqu'il y a apparition de structures/organisations (émergentes) à un niveau plus élevé qui possèdent de propriétés nouvelles non réductibles même en théorie à une composition quelconque des propriétés et/ou des lois/règles des niveaux inférieurs. L'émergence forte concerne des propriétés indépendantes de toute observation, intrinsèques au système, de sorte qu'elles vont interagir avec les autres constituants du système de manière originale. Il n'existe plus de lien causal entre les constituants de la structure émergente et ses propres propriétés. L'émergence est immanente au système.

Les exemples les plus souvent donnés sont la vie (gènes, code génétique et acides aminés), la culture (mêmes [Dawkins, 1978], langage et système de transmission et stockage - écriture -), la conscience. Pour Searle par exemple [Searle, 1992] les états mentaux sont

²³Qui est relatif à la science.

²⁴Qui relève de l'être.

²⁵« *We can say that a high-level phenomenon is strongly emergent with respect to a low-level domain when truths concerning that phenomenon are not deducible even in principle from truths in the low-level domain* ».

des propriétés émergentes, mais non réductibles à des niveaux inférieurs. Un phénomène de haut-niveau est fortement émergent s'il n'est pas déductible à partir des niveaux plus bas.

Émergence faible

[Bedau, 1997] nous propose la définition suivante : l'état macroscopique P du système S étant donné les microdynamiques D est émergent au sens faible si P peut être dérivé de D et des conditions externes de S mais seulement à partir d'une simulation.

Chalmer écrit : « *We can say that a high-level phenomenon is weakly emergent with respect to a low-level domain when truths concerning that phenomenon are unexpected given the principles governing the low-level domain* ».

2.3.4 Mesure de la complexité

Une propriété souvent mise en avant pour caractériser l'émergence ou plutôt l'auto-organisation d'ailleurs, c'est l'accroissement de l'ordre, ceci de manière interne au système. Cet accroissement est-il mesurable? On pense tout de suite au second principe de la thermodynamique, cependant il considère le système isolé. Un concept plus applicable est l'entropie statistique H de [Shannon, 1948] qui peut s'appliquer à tout système pour lequel un espace des états E est défini. Elle exprime l'incertitude que l'on a au sujet de l'état e du système en terme de probabilité de distribution $P(e)$.

$$H(P) = - \sum_{e \in E} P(e) \log_2 P(e) \quad (2.1)$$

On constate que toutes choses égales par ailleurs, H augmente avec le nombre d'états possible donc une réduction du nombre des états possibles diminue cette mesure. Il faut noter également que les probabilités sont relatives à un niveau d'observation et ce qui est le plus probable au niveau N ne l'est pas nécessairement au niveau $N + i$. Ce type de mesure dépend fortement de l'observateur qui définit les états qui sont pertinents pour modéliser/représenter le phénomène, de plus différentes mesures peuvent être obtenues en fonction des observations. Supposons qu'au niveau N il y ait quatre états : a_1, a_2, a_3, a_4 , au niveau $N + 1$ on agrège a_1 avec a_2 , a_3 avec a_4 , ce qui nous donne $A_1 = \{a_1, a_2\}$ et $A_2 = \{a_3, a_4\}$.

Soit la distribution initiale de probabilité : $P(a_1) = P(a_3) = 0,1$ et $P(a_2) = P(a_4) = 0,4$. Si le système est dans l'état A_1 soit il est dans l'état a_1 ou l'état a_2 , on fait de même pour A_2 , donc $P(A_1) = P(A_2) = 0,1 + 0,4 = 0,5$. En utilisant eq. 2.1 $H = 1,72$ au niveau N et $H = 1$ au niveau $N + 1$.

Considérons, maintenant, une évolution du système, on a la distribution suivante : $P(a_1) = P(a_2) = 0,2$ et $P(a_3) = P(a_4) = 0,3$, alors $P(A_1) = 0,4$ et $P(A_2) = 0,6$, $H = 1,97$ et $\frac{\partial H}{\partial t} = 0,25$ au niveau N , $H = 0,97$ et $\frac{\partial H}{\partial t} = -0,03$ au niveau $N + 1$. On constate donc que l'entropie a augmenté au niveau N et diminué au niveau $N + 1$, le système s'est donc auto-organisé du point de vue de l'observateur.

L'ordre qui surgit peut être un ordre trivial, résultat d'une émergence simple, il y a diminution de la complexité aléatoire, l'ordre ne produit pas de nouveauté en dehors de lui-même. À l'opposé l'ordre peut être créateur jusqu'à l'autopoïèse. C'est au travers des travaux de Kolmogorov, de Chaitin et de Bennett [Delahaye, 1999] que des outils peuvent être dégagés.

La complexité de Kolmogorov-Chaitin [Li and Vitanyi, 1993] est définie sur les objets numérisables autrement dit descriptibles par une suite de 0 et de 1 et c'est la mesure des ressources informatiques nécessaires pour l'engendrer. Un programme peut s'écrire comme une suite finie de 0 et de 1, le programme est autolimité si la longueur totale de la suite est donnée à l'intérieur même du programme ce qui implique que les instructions de début et de fin appartiennent au programme. La complexité de Kolmogorov-Chaitin d'un objet numérisable est alors la longueur du plus petit programme autodélimité capable de l'engendrer. Considérons les deux chaînes de longueur 50 suivantes :

```
0101010101010101010101010101010101010101010101010101010101010101
011000111001010100010010100011001011001001100111111
```

La première peut être décrite par 25 répétitions de 01 et la seconde n'a aucune description simple et évidente sauf à écrire la chaîne elle-même. Un autre exemple significatif proposé par Delahaye est trois images en noir et blanc d'un million de pixels :

1. Une image toute blanche ;
2. Une image d'un arbre ;
3. Une image où les pixels noirs sont parfaitement mélangés avec les blancs.

L'image toute blanche peut être produite par un programme très simple, l'image de l'arbre par un programme qui contient en lui la donnée des différentes branches, des feuilles, du tronc ..., le programme est donc long, mais moins que celui pour générer l'image aléatoire. Calculer la complexité de Kolmogorov-Chaitin d'un objet, d'un système est souvent impossible, en effet le théorème d'indécidabilité de Chaitin [Chaitin, 2001] montre la chose suivante : Soit s une suite finie 0 et de 1 et $H(s)$ sa complexité de Kolmogorov-Chaitin alors dans tout système formel, seul un nombre fini d'énoncés de type $H(s) = n$ sont démontrables. Donc le plus souvent la complexité d'une suite s ne peut être fixée, il existe néanmoins des façons approchées de calculer la complexité aléatoire comme par exemple les algorithmes de compression sans perte d'information. Cette complexité mesurée n'est pas suffisante pour la problématique des systèmes complexes, elle mesure l'ordre sans règles, sans apport de nouveauté. C'est dans les travaux de [Bennett, 1986, Bennett, 1988, Bennett, 1990] qu'il faut aller chercher une définition complémentaire. Il prend en compte le temps de calcul du plus court programme qui produit l'objet, l'entité le système ... Plus formellement, c'est le temps requis par une machine de Turing pour calculer un objet à l'aide du plus court programme. Le temps de calcul s'appelle profondeur logique. Ainsi, si l'on reprend l'exemple des images, la profondeur logique de l'image blanche et de l'image aléatoire sont très faible et inférieure à celle de l'arbre.

Les différentes mesures que nous venons de présenter rapidement sont incomplètes, souvent inadaptées et surtout très difficilement «computable» , néanmoins elles offrent un

angle de réflexion très intéressant, qui espérons le devrait se développer, pas uniquement en direction de la physique statistique comme c'est le cas actuellement mais également en direction de l'informatique qui a son mot à dire. Il devrait être possible de définir à terme le sens de variation et la vitesse de l'émergence.

Un point de vue intéressant est celui de [Dessalles, 1992, Bonabeau and Dessalles, 1997], qui lie la complexité à l'émergence en définissant cette dernière comme une soudaine réduction de complexité dans un système d'observation.

Ils considèrent :

- Un système comportant un grand nombre d'éléments ;
- Un observateur capable de percevoir l'évolution du système et traiter cette information.

La complexité (relative) du système à un instant donné est mesurée comme la plus courte description que l'observateur peut produire à l'aide de ses détecteurs. De façon plus formelle, soit S un système, soit D un ensemble de détecteurs et soit T un ensemble d'outils permettant de calculer une description des structures détectées grâce à D . Considérons maintenant un détecteur D_k inactif au temps t et actif au temps $t + \Delta t$ alors

$$\begin{cases} C_t(S/T, D_1, \dots, D_{k-1}, D_k) = C_t(S/T, D_1, \dots, D_{k-1}) \\ C_{t+\Delta t}(S/T, D_1, \dots, D_k) < C_t(S/T, D_1, \dots, D_{k-1}) \end{cases} \quad (2.2)$$

Ceci est possible car certains D_i sont redondant avec D_k . Ces D_i peuvent être omis dans la description elle est de ce fait plus courte, la complexité relative a donc diminué.

Ils laissent l'outil de mesure à l'observateur qui signalons le au passage, peut être aussi bien interne au système qu'externe.

2.4 Typologie de l'émergence

Nous avons passé en revue dans ce qui précède, de façon non exhaustive mais avec une volonté de mettre en avant les points importants de notre point de vue, ce qui peut permettre de caractériser l'émergence. Pour proposer une classification, nous allons nous appuyer sur la causalité et en particulier sur la nature des rétro-actions, cela veut dire que les aspects synchroniques, diachroniques sont laissés de coté de même que les mesures de l'ordre. On reprend en filigrane la classification de [Bedau, 2003], notre taxinomie s'articule autour de trois formes :

1. Émergence simple ;
2. Émergence faible ;
3. Émergence forte.

2.4.1 Émergence simple

Chacun des éléments qui interagissent ont un rôle fixe et prévisible. Le fonctionnement et le rôle du système est prévisible cependant la fonction du système est différente de la

fonctions de ses composants [Abbott, 2006]. Il n'y a pas de rétro-action mais par contre de la pro-action²⁶ (cf. figure 2.9).

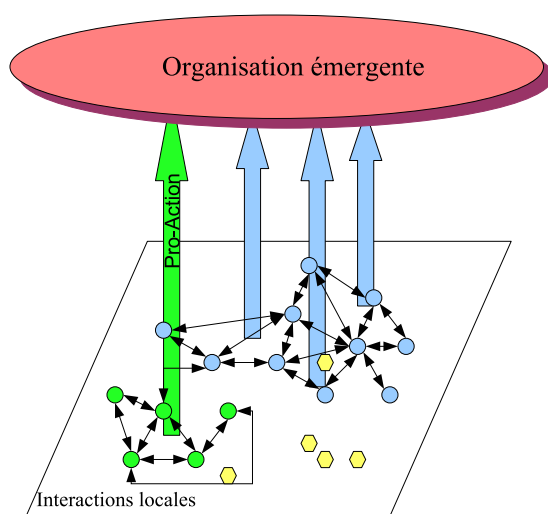


FIG. 2.9 – Émergence simple avec pro-action.

L'horloge et son mécanisme constitués d'engrenages est un bon exemple. [Jones, 2003] parle dans ce cas d'émergence de premier ordre et le comportement général du système est généré par le «feedforward» de ses composants.

On peut également classer dans ce type d'émergence, les propriétés statistiques d'un nombre identique d'entités ou de particules, on pense par exemple à la température ou à la pression. Cette forme d'émergence ne présente pas de caractère diachronique et n'offre pas de nouveauté, c'est une forme de composition. L'émergence dans ce cadre est prédictible, et l'on peut considérer le système comme fermé.

2.4.2 Émergence faible

Les entités interagissent et s'influencent créant de l'organisation uniquement visible à un niveau plus global (cf. figure 2.10). Cette auto-organisation rétroagit sur le niveau plus bas imposant des contraintes aux interactions locales et aux entités. De ce fait les entités s'adaptent en faisant évoluer leur comportement et leur rôle.

C'est sans doute la forme la plus courante d'émergence, celle que l'on retrouve dans les nuées d'oiseaux (cf. fig. 2.11), les bancs de poisson, dans des phénomènes d'urbanisme. . . C'est un phénomène prévisible mais pas dans les détails en particulier à cause de la boucle systémique pro-actions/rétro-actions.

Une façon de formuler cette idée est donc de dire qu'une propriété, un processus, une organisation est émergent au sens faible, à un niveau donné d'un système, si bien que réductible en principe aux propriétés des entités de niveau inférieur, il semble impossible de prévoir son apparition à partir de la connaissance (même intégrale) des propriétés des entités du niveau inférieur (autrement que par simulation).

²⁶Dans le sens agir en avant.

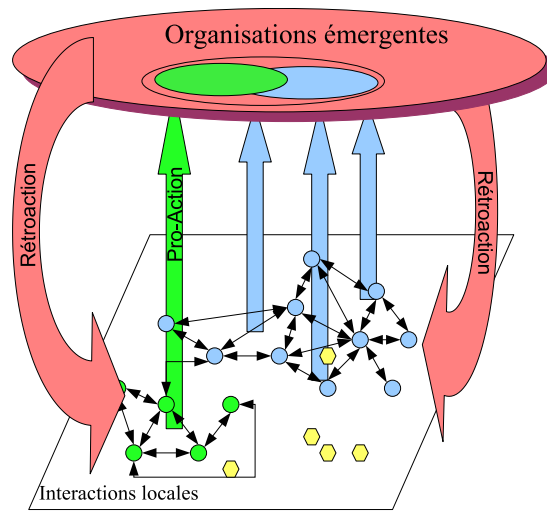


FIG. 2.10 – Émergence faible.



FIG. 2.11 – Vol d'étourneaux sansonnets

Les phénomènes d'émergence sont dans ce cas en général synchronique et diachronique et il y a apparition d'organisation. La causalité est à la fois ascendante et descendante. La nature des interactions peut être diverse, on peut néanmoins en distinguer deux : les interactions directes et les interactions indirectes s'effectuant en général par l'intermédiaire de l'environnement.

La nature de la rétroaction conditionne la stabilité de l'ensemble en effet comme on en a déjà discuté au paragraphe 2.2.3. Si la rétroaction est négative elle contraint le niveau inférieur et le système présente des caractères de stabilité, alors que la pro-action peut présenter des caractères de nouveauté qui vont modifier les organisations. Si la rétroaction est positive cela va amplifier les fluctuations au risque d'obtenir un système très instable jusqu'à sa dislocation.

Jusqu'à présent, nous avons évoqué qu'une unique boucle de rétroaction, elles peuvent néanmoins être nombreuses s'amplifiant, se compensant, ou même se régulant. Dans notre typologie, il nous faut donc rajouter l'émergence faible, mais avec de multiples rétroactions. Il existe des systèmes qui présentent des rétroactions positive à constante de temps généralement rapide et des rétroactions négatives à constante de temps plus long. Les systèmes physiques de réaction/diffusion, certains phénomènes en dynamique de population et les systèmes d'activation/inhibition au niveau du vivant en sont des exemples.

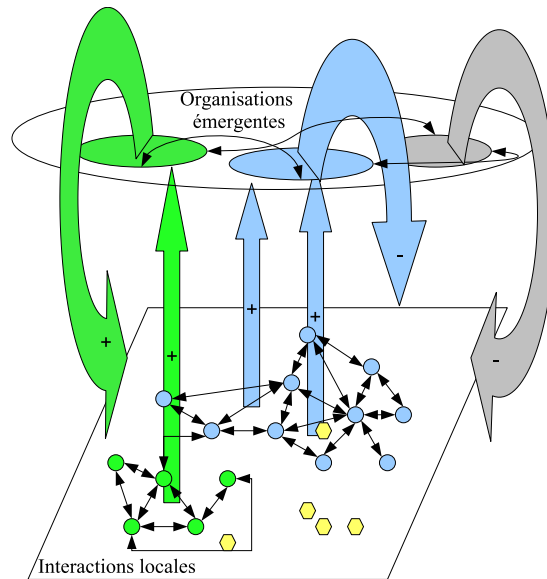


FIG. 2.12 – Émergence faible multiple

2.4.3 Émergence forte

Avant de tenter de préciser le contour de la notion de l'émergence forte, il me semble nécessaire de préciser qu'à mon avis cela peut dépendre de l'état de nos connaissances. S'il ne me semble pas contestable de dire qu'un comportement collectif peut émerger des comportements individuels et que ce comportement collectif rétroagit sur les individus,

l'exemple des fourmis est explicite, par contre l'absence de causalité dans l'émergence forte peut sembler sujette à caution en fonction de nos connaissances. Avant la découverte des phéromones et de leur rôle on aurait pu penser que le mécanisme de recrutement était un cas d'émergence forte ²⁷.

Il y a émergence forte lorsqu'il n'existe pas de causalité entre les éléments/structures/propriétés émergent(e)s de niveau supérieur et les propres propriétés de bases des éléments constitutifs de niveau inférieur. Ce qui a émergé est indépendant de tout observateur, intrinsèque au système. Ainsi la vie serait une propriété émergente forte des gènes, du code génétique et des acides aminés, la culture des mèmes, du langage et des systèmes d'informations (écriture mais aussi le web ...) et enfin n'oublions pas la conscience (primaire) qui émergerait de la catégorisation perceptive, de la mémoire et de l'apprentissage.

Au risque d'être un brin provocateur puisqu'il me semble que l'émergence forte repose sur l'absence de causalité on devrait parler d'émergence forte uniquement dans le cas où l'absence de causalité à été démontrée !

2.5 Intelligence collective

Dans les sociétés d'insectes, le «projet» global n'est pas programmé explicitement chez les individus, mais émerge de l'enchaînement d'un grand nombre d'interactions élémentaires entre individus, ou entre individus et environnement. Il y a en fait intelligence collective construite à partir de nombreuses simplicités individuelles.

Jean-Louis Deneubourg

Pour qualifier les approches collectives lieu d'interactions multiples, on parle en effet souvent d'intelligence collective, ou intelligence en essaim, cela constitue un des domaine de l'intelligence artificielle distribuée. Le terme intelligence en essaim a été introduit par [Beni and Wang, 1989] dans le cadre de la robotique cellulaire, un robot consiste alors en un ensemble de cellules qui s'auto-organisent selon la tâche à traiter.

L'intelligence en essaim s'inspire en large partie du comportement de groupes ou de sociétés d'animaux dans la nature. Comment, par exemple, les individus d'une colonie de fourmis qui nous semblent si frustrés, peuvent ils bâtir des nids dont la taille est plusieurs centaines de fois celle de leur bâtisseurs, organisés, structurés pour maintenir la vie en collectivité d'un nombre très important d'individus, comparable à des villes, et parfois même des réseaux de villes sur plusieurs kilomètres, avec leurs réserves, leurs crèches,

²⁷Et d'ailleurs la colonie de fourmis n'est-elle pas réellement le résultat d'une émergence forte si l'on considère comme Richard Dawkins [Dawkins, 1978] que les organismes ne seraient que le truc utilisé par les gènes pour assurer leur survie et leur multiplication : «*Nous sommes des machines destinées à assurer la survie des gènes, des robots programmés de façon aveugle pour transporter et préserver les molécules égoïstes appelées gènes*»

leurs chambres, leurs cimetières, une régulation de la température, un approvisionnement en nourriture, des groupes à but ouvrier, guerrier, ... ? La recherche des mécanismes sous-jacents et des moyens de les simuler pour les réutiliser, ou en inventer de nouveaux, est l'axe de développement majeur de l'intelligence en essaim.

Les modèles déjà mis au point par les biologistes et les informaticiens permettent de simuler une partie du comportement de certains animaux sociaux ou eusociaux. Par exemple le comportement bâtisseur de termites, d'abeilles ou de guêpes, le comportement de chasse des fourmis, ou encore le comportement de bancs de poissons, de vols d'oiseaux, de hordes ou de hardes. Ces modèles sont basés sur une formalisation, souvent assez simple, des comportements individuels au sein d'un groupe, plutôt que sur la description de l'évolution générale du groupe.

Les systèmes collectifs sont souvent capables, non pas au niveau de l'individu mais bien au niveau du groupe, de comportements d'apprentissage, d'adaptation aux changements, de robustesse vis-à-vis des cas non prévus, ... Ce qui fait la particularité de ces approches réside dans le fait que les entités formant l'essaim ont un comportement en général très simple, le plus souvent réactif ce qui présente un grand intérêt pour les approches informatiques.

Les modèles distribués (individus centrés, agents, basés sur la représentation des interactions ...) représentent le phénomène à un niveau qui permet d'observer la formation d'organisations, la création de formes, au sein du groupe représenté. Ils permettent la modélisation, la représentation et l'étude des interactions des entités les unes avec les autres ainsi qu'avec l'environnement. La modélisation explicite de ces interactions rend possible diverses observations :

- la formation de sous-groupes d'individus au sein de la population ;
- la construction d'éléments dans l'environnement ;
- le fonctionnement de castes ;
- la rétroaction de ces éléments sur les sous-groupes et la population.

Cette liste n'est bien entendu pas exhaustive, cependant elle montre bien que certains éléments essentiels sont fournis par une modélisation basée sur des entités, éléments que nous pouvons utiliser, en les adaptant, pour mener à bien d'autres tâches. En particulier nous verrons avec le chapitre consacré à la modélisation d'un écosystème (ch. 3), mais également dans celui traitant du système immunitaire que la capacité à construire des éléments dans l'environnement est d'une grande richesse applicative.

Plus précisément, qu'entendons nous par approche collective ? Toutes les approches collectives ont en commun la définition suivante : *Comportement d'une population d'individus interagissant **localement** les uns avec les autres, ainsi qu'avec leur environnement.*

Cette définition est bien sûr très générale, et donc imprécise. Elle reprend la citation de Jean-Louis Deneubourg que l'on retrouve au début de ce paragraphe, plus spécifiquement ciblée sur les sociétés d'insectes. Ce dernier cependant ajoute la notion de « projet global », non programmé explicitement dans le comportement des individus, et parle ainsi d'« intelligence collective ». Ainsi une définition d'intelligence collective serait : *Comportement d'une population d'individus aux capacités simples dont les interactions **locales** inter-individus et avec l'environnement permettent l'émergence et la réalisation d'un projet global non programmé explicitement.*

Dans ces deux définitions, on insiste sur le caractère local des interactions entre individus. Ces modèles sont en effet caractérisés par une décentralisation totale. Bien que, par exemple, de nombreuses colonies d'insectes aient ce que l'on nomme souvent une «reine», ces individus que l'observateur humain a d'abord privilégié par anthropomorphisme sont cantonnés à la reproduction et en aucun cas n'ont de vision globale de l'état de la colonie, et ne distribuent d'ordres ou de lois sur le comportement général²⁸.

Cette dernière définition peut aussi paraître insuffisante car elle ne semble pas définir comment ce projet global va être mené à bien. Elle parle de comportement simple des individus, n'ayant aucune vision globale, n'ayant pas connaissance du projet global.

La réponse a trait aux interactions très nombreuses entre les individus et avec l'environnement.

2.5.1 Interactions, auto-organisation et stigmergie

On retrouve dans les mécanismes d'intelligence collective, ce que nous avons mentionné précédemment (cf. 2.2.3), [Théraulaz and Bonabeau, 1997, Bonabeau et al., 1997] :

- L'existence d'interactions multiples, le comportement des uns influence et contraint celui des autres ;
- L'amplification par rétroaction positive, dans le cadre du fourragement chez les fourmis : la trace chimique de phéromone par celles qui ont découvert une source de nourriture conduit les autres congénères à suivre cette piste et à la renforcer.
- L'existence de rétroaction négative, l'évaporation des phéromones qui permet aux fourmis d'oublier les chemins infructueux.
- L'amplification des fluctuations, le comportement n'est pas totalement déterministe et cela permet de créer de la nouveauté et de la diversité, en mettant en place une nouvelle boucle de rétroaction positive. Dans le cas des fourmis cela permet de découvrir ou d'exploiter de nouvelles sources de nourriture [Resnick, 2000].

Nous nous interrogeons, comment le projet global pouvait être mené à bien et la réponse que nous donnions était : les interactions ; dans le cadre des insectes sociaux ce sont des interactions indirectes, l'action d'un individu modifie l'environnement. Il est donc support de communication et les actions prennent corps (trace) à l'intérieur de lui. Nous allons reprendre largement cette métaphore dans le cadre de nos artefacts informatiques.

Une définition formelle de la stigmergie²⁹ est donnée par [Kennedy and Eberhart, 2001] : *Mode de communication par la modification de l'état de l'environnement de telle manière que cela affecte le comportement des autres pour qui l'environnement est un stimulus.*

On distingue en général deux types de stigmergie :

1. la stigmergie qualitative ;
2. la stigmergie quantitative.

²⁸Cependant, par son unicité, l'individu reproducteur unique influence bien plus la colonie, et peut avoir un impact sur tous les individus. C'est le cas de toutes les populations eusociales.

²⁹On aurait pu prendre celle de [Grassé, 1959] «*La coordination des tâches, la régulation des constructions ne dépendent pas directement des ouvriers, mais des constructions elles-mêmes. "L'ouvrier ne dirige pas son travail, il est guidé par lui."* C'est à cette stimulation d'un type particulier que nous donnons le nom de stigmergie (stigma : piqûre, ergon : travail, œuvre = œuvre stimulante)

La première introduit la notion de sémantique attachée au message déposé dans l'environnement. La seconde introduit le concept d'attraction dans un processus auto-catalytique. En réalité, la majeure partie des stigmergies quantitatives sont aussi, bien entendu, qualitatives.

La stigmergie s'inscrit dans une boucle systémique, l'environnement s'(auto-)organise, se structure par l'intermédiaire des entités qui y évoluent et rétro-agit sur ces mêmes entités.

On l'aura compris la stigmergie offre donc un moyen de contrôle et de coordination distribué qui permet la réalisation d'une tâche et l'auto-organisation est un effet de bord, forme de résultat d'un calcul émergent [Forrest, 1990] s'exprimant par une cohérence globale générée par des interactions locales.

2.6 Conclusion

Nous avons tenté d'esquisser un contour aux systèmes constitués d'un grand nombre d'entités en interaction et nous sommes bien vite arrivé au problème des systèmes complexes, de l'auto-organisation et de l'émergence. L'étude de ces systèmes va nous conduire souvent à les simuler et à chercher à réduire la complexité en utilisant l'émergence et à détecter les organisations.