

Théorie des systèmes complexes

Georges Lopicard

Les systèmes complexes de nature variées, par exemple écologiques, biologiques, sociaux, économiques, ont-ils des propriétés ou des lois communes ? Comment intervenir dans ces systèmes pour contenir leur dynamique, pour les faire évoluer dans le sens des objectifs souhaités ? Voilà des questions importantes pour la maîtrise des multiples risques économiques, écologiques, sociaux... créés par les progrès des technologies et par la mondialisation. Déjà un vaste mouvement s'organise pour relever ces défis : multiplication des études sur les systèmes complexes, développement des échanges entre les spécialistes de disciplines distantes qui s'ignoraient. On reconnaît que les sciences dites « dures » parce qu'elles relèvent des mathématiques sont moins « dures » qu'on le pensait. Il émerge de ce mouvement une nouvelle perception des systèmes complexes, des nouvelles méthodes d'étude de leur comportement appelées ici « le nouveau paradigme de la complexité ». Vous trouverez ci-dessous une présentation sommaire de cette révolution épistémologique.

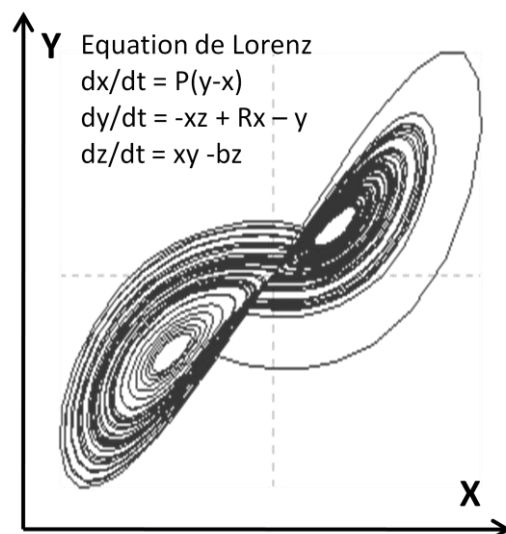
Théorie du chaos

Un système relève de la théorie du chaos s'il est extrêmement sensible à des petites causes et si son comportement a un aspect cyclique. Par exemple les systèmes météorologiques sont très sensibles à des petites causes, le fameux effet papillon, et leur dynamique est cyclique : alternance de journées ensoleillées et pluvieuses, journées, saisons...

Henri Poincaré a été le précurseur de la théorie du chaos à la fin du XIX^{ème} siècle dans des études mathématiques des systèmes à trois corps et du système céleste. Ses travaux sont tombés dans l'oubli. En 1963 Edward Lorenz découvre les propriétés chaotiques d'un système dynamique d'équations non linéaires simples comprenant trois variables en faisant une simulation sur ordinateur.

La dynamique d'un système de variables x , y , z est représentée par la trajectoire d'un point de coordonnées $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. La figure ci-contre montre la projection de l' trajectoire du système d'équations de E. Lorenz dans le plan X , Y .

La figure ci-contre montre la projection dans le plan XY de la trajectoire du point $x(t)$, $y(t)$ et $z(t)$ du système d'équations de Lorenz.



Les systèmes ont souvent plus de trois variables. Leurs trajectoires sont alors définies dans des espaces de « n » dimensions, une dimension pour chaque variable. Ces espaces des variables sont souvent appelés « espace des phases ». Chaque point d'un espace des phases représente un état du système. Pour obtenir des représentations graphiques compréhensibles des trajectoires il faut les projeter dans des espaces de deux ou trois dimensions qui sont définis en faisant parmi l'ensemble des variables des choix variables pertinents pour les phénomènes étudiés.

Les trajectoires des systèmes qui relèvent de la théorie du chaos convergent généralement vers de zones appelées attracteur. Un même système peut avoir un ou plusieurs attracteurs. Les attracteurs sont importants parce qu'ils représentent l'ensemble des possibilités d'évolution d'un système. Les attracteurs sont de types variés :

- ✓ ponctuel : une bille lancée dans un bol
- ✓ circulaire : un pendule sans frottement
- ✓ étrange : cas des équations de E. Lorenz (voir la figure ci-dessus). Les trajectoires qui convergent vers un attracteur étrange ont une allure cyclique mais ne repassent jamais par le même point. Ces attracteurs sont fréquents dans les systèmes d'équations dynamiques non linéaires.

Chaque attracteur se trouve dans un « bassin d'attraction ». Toute trajectoire située dans un bassin d'attraction converge vers l'attracteur de ce bassin.

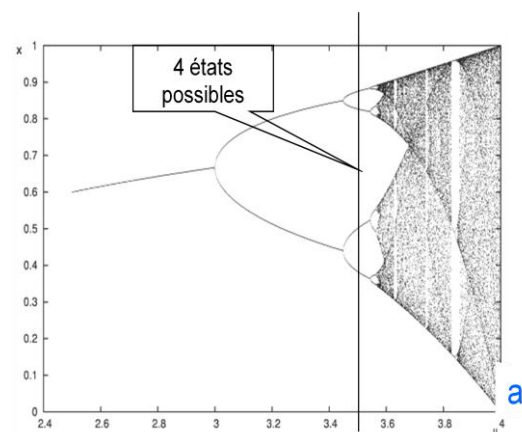
Un système est à un point de bifurcation si une petite cause, modification d'une variable, peut alors le faire basculer dans l'un ou l'autre des deux bassins d'attraction, donc vers l'un ou l'autre des deux attracteurs. Les points de bifurcation se trouvent souvent à la frontière entre des bassins d'attraction.

Les systèmes qui relèvent de la théorie du chaos comprennent :

- ✓ **Les systèmes formels.** Ils sont définis mathématiquement, souvent sous la forme d'équations différentielles non linéaires, par exemple les équations de E. Lorenz.

Ils peuvent aussi, être définis au moyen de suites récurrentes non linéaires, par exemple la suite de Feigenbaum : $X_{n+1} = aX_n(1-X_n)$, (n : temps discret, X : variable, dynamique, a : paramètre). La nature des attracteurs de cette suite est très sensible aux valeurs du paramètre « a » :

- a < 3 : attracteur point fixe



- $3 < a < 3,57$: attracteur périodique. Période = 2^p : « p » entier croissant avec a.
 - $3,57 \leq a < 4$: attracteur fractal ; succession de points différents.
 - $4 < a$: suite monotone croissante qui tend vers l'infini.
- ✓ **Les systèmes empiriques** qui relèvent de l'observation et qu'il n'est pas possible de formaliser exactement : systèmes météorologiques, chimiques, électriques.... Ces systèmes peuvent être modélisés au moyen d'équations différentielles non linéaires et relèvent donc de la théorie du chaos : sensibilités aux conditions initiales, dynamique quasi cycliques, convergence vers des bassins d'attraction...

Pour les mathématiciens les systèmes qui relèvent de la théorie du chaos sont parfaitement prévisibles parce qu'il s'agit de systèmes formels dont il est possible de définir rigoureusement l'ensemble de leurs conditions initiales.

Pour les physiciens ce sont des systèmes empiriques imprévisibles à cause de leur extrême sensibilité aux conditions initiales qu'il est impossible de définir rigoureusement, voire de les dénombrer. Ces systèmes évoluent vers des bassins d'attraction mais leurs dynamiques au sein de ces bassins sont imprévisibles. Souvent on ne connaît pas les bassins d'attraction, par exemple on ne connaît pas ceux de l'évolution des espèces animales.

Les contributions de la théorie du chaos à la théorie des systèmes complexes sont importantes :

- ✓ Prise de conscience de la sensibilité de la dynamique des systèmes aux conditions initiales qui était souvent sous-estimée.
- ✓ Nouvelle démarche dans l'étude des systèmes avec les questions suivantes : comment choisir les variables les plus pertinentes pour étudier le comportement (les trajectoires) du système ? quels sont les bassins d'attraction ? Y a-t-il des points ou zones de bifurcation ?

Théorie des systèmes complexes

La théorie des systèmes complexes est récente, son contenu et son vocabulaire sont encore incertains. Cependant elle est l'objet de nombreux travaux de recherche parce qu'il se développe une prise de conscience de l'omniprésence des systèmes complexes dans de nombreuses disciplines économiques, sociales, écologiques... et de la nécessité de comprendre leur fonctionnement pour pallier les nombreux risques engendrés par les progrès des technologies et par la mondialisation.

Plusieurs théories importantes conçues au cours du XX^{ème} siècle ont contribué au développement de la théorie des systèmes complexes :

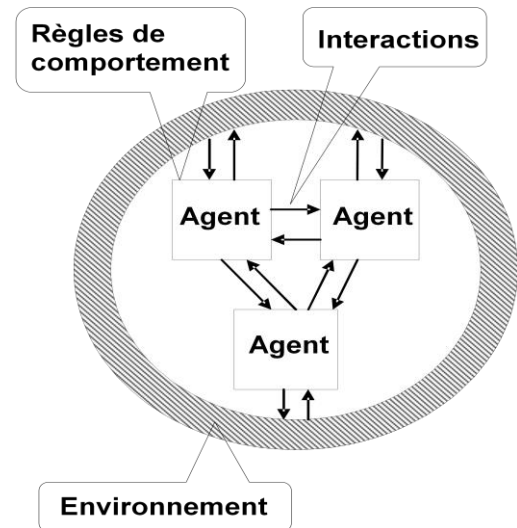
- ✓ La théorie du chaos exposée ci-dessus

- ✓ La cybernétique définie par N.Wiener dans le livre « Cybernetics or Control and communication in the animal and the machine » publié en 1948. La cybernétique étudie le fonctionnement des systèmes asservis avec les concepts de rétroaction (feedback) positive ou négative. Elle formalise les graphes d'interactions entre les organes d'un système.
- ✓ La systémique avec la contribution importante de Ludwig Bertalanffy présentée dans le livre « General system theory » publié en 1968 vers la fin de sa vie. La systémique repose sur le concept de holisme, antithèse du réductionnisme, qui affirme que pour comprendre le fonctionnement d'un système il faut étudier simultanément l'ensemble de ses composants avec leurs interactions et non pas étudier isolément chaque composant.

La création du Santa Fe Institute aux USA dans l'état de New Mexico en 1984 sur l'initiative de personnalités Prix Nobel et Field Medal, et avec le soutien du président de la banque City Corp. qui estimait que les outils d'analyse économique étaient tout à fait inappropriés a été un événement important.

Cet institut a pour mission de rechercher des lois communes à des systèmes complexes de natures variées : économiques, biologiques, sociaux..., de définir des outils d'analyse et de prévision.

Un système complexe est constitué d'agents qui interagissent entre eux, avec leur environnement et avec les phénomènes émergents créés par ces interactions.



Les agents peuvent être de nature variée : un animal, une personne, un groupe de personnes, une institution, un organe, une cellule, un enzyme...

Les règles de comportement d'un agent définissent les stimuli qu'il émet vers les autres agents en fonction des stimuli qu'il reçoit des autres agents et de son environnement. Ces règles sont évolutives en fonction du vécu de l'agent : stimuli qu'il a reçus et qu'il a émis.

L'émergence, propriété importante des systèmes complexes, est un processus de création de phénomènes par les interactions des agents : entre eux et avec leur environnement. Les phénomènes émergents sont de natures variées par exemple l'apparition d'un nouvel agent, d'une modification de l'environnement, d'une loi de distribution des événements... Ces phénomènes peuvent être surprenants et défier l'intuition et le bon sens. Les émergences ne sont pas planifiées ni pilotées par une autorité qui aurait une vue d'ensemble du système.

Le tableau suivant montre quelques exemples d'émergences en précisant les agents, les méthodes d'interaction, les phénomènes émergents.

Agents	Interactions	Phénomène émergent
Insectes sociaux	Intensité des odeurs (phéromones)	Galeries d'une fourmilière
Animaux grégaires	Vue, ouïe	Vols groupés d'oiseaux, bancs de poissons
Consommateurs	Directe : imitation Indirecte : impact de la demande sur l'offre	Prix de marché, engouements
Particules	Règles de la physique des atomes et particules élémentaires	Pression, température, courant électrique

Dans une fourmilière les agents sont les fourmis, les interactions des fourmis sont indirectes au moyen de dépôts d'hormones odorantes appelées phéromones, le phénomène émergent est l'habitat des fourmis constitué de galeries. Il n'y a aucune coordination centralisée, seulement des interactions locales entre des fourmis qui n'ont aucune vue d'ensemble de la fourmilière.

Des simulations sur ordinateur ont permis de démontrer que la formation des vols groupés d'oiseaux ou des bancs de poissons résulte des interactions entre des oiseaux ou poissons qui obéissent chacun à quelques règles de comportement très simples comme le maintien d'une distance vis-à-vis de leurs voisins et des obstacles.

Un marché peut être conceptualisé comme un système complexe dont les agents sont les consommateurs et l'environnement est l'offre. Par son acte d'achat un consommateur interagit avec les autres consommateurs indirectement par l'impact de cet achat sur les prix et l'évolution des produits et directement par l'influence de son acte sur les comportements des consommateurs informés de son achat. Les phénomènes émergents sont les prix de marchés, l'évolution de l'offre, les engouements.

Il n'existe pas aujourd'hui une méthode reconnue de classement des systèmes complexes. Voici un modeste essai de classement inspiré des travaux de John Holland du Santa Fe Institute quant à la définition des systèmes complexes adaptatifs :

- ✓ **Systèmes de sciences physiques** : fluides en turbulence, systèmes météorologiques, processus de percolation ou diffusion, cellules de Bénard. Les agents de ces systèmes ont des règles de comportement notablement plus simples que celles des systèmes de sciences du vivant.
- ✓ **Systèmes des sciences du vivant**. Ces systèmes comprennent au moins un agent « vivant » : microbe, animal, personne, structure sociale. Ils possèdent les propriétés des systèmes complexes adaptatifs présentés

ci-dessous. Exemples de système des sciences du vivant : systèmes biologiques, économiques, écologiques, sociaux, une ville, une entreprise, le réseau de l'Internet avec les internautes parce que les interagants sont des agents du système .

- ✓ **Systèmes artificiels (artéfacts).** Ce sont des systèmes construits par l'homme essentiellement au moyen de l'informatique. Exemples : réseaux de distribution de l'électricité, robots collectifs, objets informatiques en interaction, réseaux de l'Internet sans les internautes. Ces systèmes ont la potentialité des fonctionnalités des systèmes complexes adaptatifs.

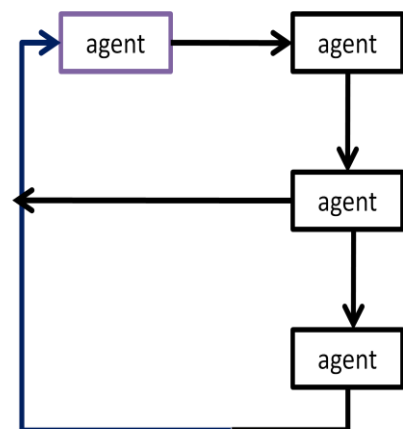
Propriétés des systèmes complexes adaptatifs

Voici un essai de classement des propriétés des systèmes complexes :

- ✓ Multiplicité des **réseaux d'interactions bouclés** avec des rétroactions négatives et positives (**feedback**). Ces propriétés relèvent de la cybernétique.
- ✓ **Sensibilité aux conditions initiales, dynamique cyclique, convergence vers des bassins d'attraction et bifurcations, points de bascule.** Ces propriétés relèvent de la théorie du chaos
- ✓ **Holisme** : nécessité de considérer un système dans son ensemble, agents et interactions, pour étudier son fonctionnement
- ✓ **Création de phénomènes émergents souvent surprenants** : adaptation, évolution, auto-organisation, coévolution, reproduction (création de nouveaux agents), création d'organisation gigogne (sous-systèmes dans les systèmes), lois de distributions inégales, objets fractal.

Il y a rétroaction lorsqu'un agent reçoit des stimuli influencés par les stimuli qu'il a émis. Le réseau des liens entre les agents comporte de nombreuses boucles de rétroaction. La figure ci-contre comporte deux boucles d'interactions.

Les rétroactions engendrent les propriétés fondamentales des systèmes complexes : holisme, convergence vers des bassins d'attraction, dynamique cyclique, bifurcations, basculements, évolution, adaptation, émergence, auto-organisation... Elles sont présentes partout, dans les systèmes biologiques, économiques, sociaux... Les rétroactions peuvent avoir un effet stabilisateur, par exemple réguler l'offre par la demande dans un marché, ou au contraire un effet amplificateur, par exemple créer des emballements dont l'archétype est une bulle spéculative.



Boucles d'interactions

Le principe des rétroactions a été conceptualisé vers 1940 par N.Wiener dans la cybernétique. Il est surprenant que cette conceptualisation soit intervenue si tard alors que les rétroactions sont présentes partout et que les outils mathématiques permettant de les formaliser existaient dès le début du XIX^{ème} siècle. La cybernétique est notablement plus simple que la théorie de la relativité qui a été inventée au début du XX^{ème} siècle.

Les phénomènes émergents créés par les systèmes complexes, leurs capacités d'évolution et d'adaptation à leur environnement présentent des formes variées :

- ✓ **Evolution des caractéristiques des agents**, de leurs règles de comportement par exemple les évolutions des virus qui deviennent résistants à des antibiotiques, des animaux ou des personnes qui acquièrent par l'expérience de nouveaux réflexes, des groupes de personnes, des villes, des entreprises, des civilisations...
- ✓ **Auto organisation avec spécialisation des agents**, regroupement de plusieurs agents, création de structures hiérarchiques à plusieurs niveaux.
- ✓ **Coévolution de deux ou plusieurs types d'agents** par exemple les insectes pollinisateurs et les plantes qu'ils pollinisent, une entreprise et ses clients.
- ✓ **Création de nouveaux types d'agents** par exemple la création d'une organisation pour remplir une nouvelle mission.

Les capacités d'adaptation des systèmes complexes tiennent aux rétroactions qui font évoluer les règles de comportement de leurs agents en fonction de leur vécu.

Les méthodes et outils de l'étude des systèmes complexes

Les personnes qui s'intéressent aux systèmes complexes visent différents objectifs :

- ✓ **Comprendre leur fonctionnement**, leurs lois, par exemple comprendre la disparition d'une espèce dans un écosystème, l'évolution d'une ville ou d'une civilisation, l'émergence d'un engouement.
- ✓ **Prévoir leurs évolutions** : propagation d'une contagion ou d'un feu de forêt
- ✓ **Définir des interventions** sur les systèmes pour les faire évoluer dans le sens souhaité par exemple pour arrêter une contagion, pour assurer la sécurité d'un quartier.

Pour ce faire elles disposent d'une vaste panoplie de méthodes et outils : simulation basée sur des agents (par exemple au moyen d'automates cellulaires), théorie des graphes et réseaux, intelligence collective, analogie avec d'autres systèmes complexes, théorie du bord du chaos, théorie des réseaux neuronaux, morphogénèse , théorie du chaos, théorie des catastrophes, logique des variables

floues, mémétique, algorithmes génétiques, méthodes de création et d'innovation au moyen d'un processus itératif de reproduction et sélection.

L'importance de la simulation basée sur des agents justifie une brève présentation dans ce document. Cette méthode permet d'étudier le comportement dynamique des systèmes complexes. Elle doit son essor aux progrès de l'informatique. C'est une méthode itérative qui calcule l'état d'un système à l'instant « t_{i+1} » en fonction de l'ensemble de son état à l'instant précédent « t_i ». Elle est donc bien adaptée aux propriétés holistiques des systèmes complexes parce qu'à chaque instant « t_i » elle tient compte de l'ensemble de l'état du système considéré : états des agents et de l'environnement, stimuli émis par les agents et l'environnement.

La simulation basée sur des agents est une réponse à l'impuissance des mathématiques classiques dans l'étude des systèmes complexes. Il est généralement impossible de les mettre en équation à cause de la variété des agents et de leurs règles de comportement, de l'évolution des règles de comportement des agents en fonction de leur vécu. A chaque instant tous les agents peuvent avoir des règles de comportement différentes. D'autre part le nombre des objets n'est pas assez élevé pour que les lois statistiques puissent s'appliquer.

Le développement d'une application de simulation basée sur les agents est un travail important qui requiert de l'expérience. Il faut faire de nombreux essais pour assurer la conformité de la simulation à la réalité. La modélisation complète des agents cognitifs, personnes ou groupes de personnes, est impossible. Il faut donc simplifier en conservant ce qui est pertinent pour les phénomènes étudiés.

Voici quelques cas de simulation basée sur des agents réalisés pour des entreprises :

- ✓ Etude du comportement des clients dans une grande surface commerciale en fonction de l'emplacement des produits et de l'affluence
- ✓ Définition des règles d'attribution des primes à chaque manager d'une grande entreprise pharmaceutique avec le meilleur compromis entre les critères basés sur les résultats du manager et de l'entreprise
- ✓ Etude de l'impact sur le marché du Nasdaq d'une modification du nombre des décimales dans le montant des transactions

Théorie du bord du chaos

La théorie du « bord du chaos » explique le comportement d'un système complexe adaptatif par son degré de stabilité qui est défini par l'impact d'une perturbation du système :

- ✓ **Système stable** si l'impact d'une perturbation du système est faible et de courte durée.
- ✓ **Système instable** si l'impact est fort, global et permanent.

La simulation sur ordinateur des systèmes a montré qu'il existe entre la stabilité et l'instabilité un état appelé « bord du chaos » où l'impact d'une perturbation est de dimension moyenne, locale, mais de longue durée.

La théorie du bord chaos affirme que les systèmes complexes adaptatifs ont :

- ✓ des capacités d'évolution, d'innovation lorsqu'ils se trouvent dans l'état « bord du chaos »,
- ✓ un tropisme naturel vers le bord du chaos. Un excès de stabilité provoque d'instabilité et vice versa.

Degré de stabilité	Etat du système		
	Stable	Bord du chaos	Instable
Impact d'une perturbation	Faible et de courte durée	Localisé et de longue durée	Global et de longue durée
Capacité dévolution et d'innovation	non	oui	non

Il est possible de renforcer la stabilité d'un système en :

- ✓ supprimant des liens d'interaction entre les agents
- ✓ privilégiant la fréquence de certains comportements parmi l'ensemble des comportements possibles
- ✓ en encadrant le comportement des agents : éthique, réglementation, objectifs partagés

Le concept de « bord du chaos » a été découvert pendant la décennie 1970 par C. Langton en simulant sur ordinateurs des automates binaires. Le biologiste S. Kauffmann a démontré l'existence d'un état « bord du chaos » dans les réseaux maillés binaires en étudiant l'impact sur leur comportement du nombre de liens entre les nœuds. Il a montré que le graphe des relations entre les gènes dans le génome humain correspond à l'état « bord du chaos ». Pendant la décennie 1990 la théorie du « bord du chaos » a été généralisée à l'ensemble des systèmes complexes adaptatifs et a été l'objet de nombreuses publications. Aujourd'hui elle est reconnue bien qu'elle ait des détracteurs.

La théorie du bord du chaos est appliquée à des organisations, par exemple des entreprises, pour améliorer leur efficacité en tenant compte de leur nature et de leurs objectifs. Par exemple les capacités d'innovation d'une entreprise de haute technologie seront renforcées en la positionnant au « bord du chaos » au moyen d'une organisation décentralisée et d'une large autonomie de ses employés. Au contraire une entreprise avec des exigences de productivité et de régularité, par exemple le transport des personnes ou des marchandises, ou la production

d'électricité, tendra vers une organisation plutôt centralisée et aura des exigences de respect des procédures.

La société américaine Google est un exemple remarquable de positionnement au « bord du chaos ». Cette société créée en 1996 est aujourd'hui un leader mondial dans son activité avec une capitalisation boursière considérable. Le positionnement au bord du chaos est assuré par un équilibre entre des facteurs de stabilité et d'instabilité qui sont l'un et l'autre forts. Les facteurs de stabilité comprennent une éthique forte héritée du milieu de la haute technologie en Californie, une culture d'entreprise et des objectifs partagés par l'ensemble du personnel. Les facteurs d'instabilité comprennent :

- ✓ Large autonomie des employés : une journée libre par semaine pour effectuer les travaux de recherche de leur choix,
- ✓ Liberté d'auto-organisation pour des approfondissements
- ✓ Forte personnalité des employés
- ✓ Faible structure hiérarchique

Le nouveau paradigme de la complexité

La théorie des systèmes complexes est une révolution épistémologique, une nouvelle manière d'interpréter et d'étudier les phénomènes, qui est appelée dans ce document « le nouveau paradigme de la complexité ». Ce paradigme concerne particulièrement les systèmes complexes adaptatifs : systèmes biologiques, écologiques, économiques, sociaux, systèmes de l'urbanisme... En voici les points importants :

1) Les systèmes complexes fonctionnent du **bas vers le haut**. Ce sont les agents du bas de la hiérarchie qui font fonctionner les systèmes, qui produisent les phénomènes émergents au moyen des interactions entre eux et avec leur environnement. Le rôle du haut de la hiérarchie doit être limité à la création des conditions favorables à l'émergence des phénomènes souhaités. Les capacités d'adaptation, d'innovation d'une organisation ainsi décentralisée sont notablement supérieures à celles d'une structure centralisée. L'efficacité des organisations décentralisées est considérablement renforcée par les progrès des technologies qui facilitent les échanges et le partage des informations.

Il y a dans la nature de nombreux exemples de systèmes sophistiqués sans hiérarchie, par exemple dans les colonies d'insectes aucun insecte ne pilote les autres ni n'a une vue d'ensemble de la colonie,.

Il est effet difficile de faire évoluer une organisation centralisée vers une organisation décentralisée parce que c'est pour l'ensemble des personnes un changement profond de culture et des comportements. Il faut passer d'une relation de maître à subordonné à une relation de confiance mutuelle. C'est pour cette

raison que les plus belles réussites d'organisation décentralisées se trouvent dans les nouvelles organisations créées ex nihilo

- 2) **Holisme.** Les systèmes complexes ne sont pas sécables. Pour étudier un système complexe il faut considérer simultanément tous ses composants : les agents, les interactions et l'environnement. Cela est résumé par l'aphorisme « le tout est plus que la somme des parties » parce qu'il faut aussi tenir compte des interactions.
- 3) **Pluridisciplinarité.** Il faut rassembler des compétences pluridisciplinaires qui couvrent l'ensemble des facettes du système étudié. Cela découle du holisme qui ne permet pas d'étudier isolément les propriétés liées à différentes disciplines.
- 4) La **diversité** est une richesse. La diversité des agents renforce les propriétés des systèmes complexes adaptatifs : émergence, innovation, auto-organisation...
- 5) **Imprévisibilité.** Les évolutions à moyen et long terme des systèmes complexes sont imprévisibles parce qu'il est impossible de définir l'ensemble des variables avec la précision requise pour une prévision. Les exigences de précision croissent exponentiellement avec la portée des prévisions.
- 6) **Incertitude des causes.** Il peut être vain de vouloir identifier la cause d'une situation observée dans un système parce que cette situation est souvent due à de multiples causes. Il est impossible d'identifier une cause principale parmi ces multiples causes qui ont été l'objet d'une succession d'amplifications et d'atténuations dues aux rétroactions. Par exemple les causes de l'essor ou de l'affaiblissement d'une civilisation sont souvent incertaines avec des polémiques alimentées par de nombreuses thèses.

Il faut distinguer la cause accidentelle qui a déclenché un événement de l'ensemble des causes qui ont créé l'état latent qui a permis ce déclenchement. Cette cause accidentelle est facilement identifiable et est parfois considérée à tort comme la cause principale de cet événement. Il est au contraire souvent impossible d'identifier la cause principale qui a créé un état latent.

- 7) **Points de bascule et bassins d'attraction.** Les systèmes complexes sont sujets à des basculements qui sont des évolutions brutales quant à leur ampleur et leur rapidité. Par exemple un engouement collectif, une crise économique, une révolution. Un point de bascule est un état d'un système où une petite cause peut provoquer un changement profond et brutal de l'état du système.

Les systèmes complexes convergent vers des bassins d'attraction. Un basculement peut être conceptualisé comme un saut d'un bassin d'attraction dans un autre. Souvent on ne sait pas identifier les bassins d'attraction des systèmes complexes, par exemple les bassins d'attraction de l'évolution d'un écosystème, d'une civilisation, d'un système économique.

8) **Loi de distribution en puissance.** ($Y = C.X^{-\alpha}$ différent de e^x). Le nouveau paradigme de la complexité reconnaît l'importance des lois de distribution en puissance qui sont présentes partout, dans les systèmes biologiques, économiques, sociaux... Cela permet de mieux comprendre le fonctionnement de ces systèmes et éventuellement de définir les moyen d'en atténuer certains excès, par exemple les excès d'inégalités des richesses, des dimensions des villes... Les lois de puissance sont en effet profondément inégalitaires : « peu ont beaucoup et beaucoup ont peu ».

Voici un tableau synoptique des caractéristiques du nouveau paradigme de la complexité :

Approche antérieure	Nouveau paradigme de la complexité
Fonctionnement du haut vers le bas : ✓ Le haut de la hiérarchie conçoit et pilote le système ✓ Le bas de la hiérarchie, exécute les ordres	Fonctionnement du bas vers le haut : ✓ Tous les acteurs contribuent au développement et au fonctionnement du système ✓ Rôle du haut de la hiérarchie : inexistant ou facilitateur de production par les acteurs des émergences souhaitée
Réductionnisme : déduire le comportement du système de chaque partie prise isolément	Holisme : étudier un système comme un tout non sécable
Cloisonnement des disciplines	Pluridisciplinarité pour faciliter l'étude des interactions des différentes facettes d'un système
Equipes homogènes : même formation, même vécu...	La diversité des agents d'un système est une richesse : formation, expérience...
Prévisibilité	Imprévisibilité des événements, des évolutions
Identification des causes des événements : causalités en cascade	Incertitude des causes des événements des situations observées : causalités en boucles
Progressivité des relations de cause à effet	Points de bascule : une petite cause peut avoir un impact majeur
Lois statistiques en cloche dominantes	Lois de puissance dominantes

Conclusions

Les systèmes complexes adaptatifs sont présents partout : systèmes biologiques, écologiques, économiques, sociaux... Leurs impacts sur la société, sur la planète, sont considérablement amplifiés par les progrès des technologies et par la mondialisation avec de nouvelles opportunités de progrès pour l'humanité mais aussi des risques sérieux.

On peut considérer que le degré de stabilité d'un système est la résultante de ses facteurs de stabilité et d'instabilité.

Les facteurs d'instabilité et de désordre des systèmes biologiques, économique, sociaux, progressent rapidement avec les progrès des technologies, notamment de l'internet, et de la mondialisation : multiplication des interactions des agents et des rétroactions, interactions à la vitesse de la lumière qui augmentent considérablement la vitesse d'évolution des systèmes comme un film déroulé à grande vitesse, ondes de chocs généralisées dues à la propagation des mêmes engouements et à l'utilisation des mêmes processus de décision, multiplication des transferts d'objets physiques et des espèces animales et végétales.

Les facteurs de stabilité et d'ordre progressent au contraire lentement parce qu'ils sont liés à l'évolution des mentalités : régulation, valeurs civiques et éthiques partagées mondialement, accord sur les objectifs et leur mise en œuvre, gouvernance planétaire transcendant les états.

Cette prépondérance des facteurs d'instabilité accroît considérablement les risques d'instabilité et de désordre planétaire.

Il y a cependant un espoir que les sciences de la complexité, particulièrement la théorie des systèmes complexes, aident à pallier ces risques. Les sciences de la complexité ont déjà apporté une large contribution : émergence du nouveau paradigme de la complexité présenté dans ce document ; conceptualisation de l'existence de propriétés communes à des systèmes de nature variées par exemple biologiques, écologiques, économiques, sociaux ; progrès de l'informatiques qui renforcent considérablement les méthodes et outils d'étude, de modélisation, de simulation des systèmes complexes.

La théorie des systèmes complexes est une science jeune au contenu encore mal défini mais elle est en plein essor. Partout dans le monde e nombreux projets de recherches sont lancés, de nombreux colloques sont organisés.

Références

- Site
 - Mount Vernon Consulting :
http://www.mountvernon.fr/Sciences_complexite.htm
 - Bonabeau : http://icosystem.com/about_management.htm
- Systèmes complexes
 - “la Complexité, vertiges et promesses” 18 interviews par Réda Benkirane - Poche Le Pommier
 - Generative social science (Studies in agent-based computational modeling) Josuha M. Epstein
 - Complexity : The emerging science at the edge of order and chaos – Mitchell Waldrop
 - Hidden order : How adaptation builds complexity – John H.Holland
 - Emergence : From chaos to order – John H.Holland
- Réseaux
 - “Linked, *The New Science of Networks*” - Albert-Làszlo Barabási - Perseus Publishing
 - “6-degrees, *The sciences of a connected age*” - Duncan J. Watts - Norton
 - “Sync *The Emerging Science of Spontaneous Order*” - Steven Strogatz
- Sociologie appliquée
 - « Les sciences de l'imprécis » Abraham A. Moles - Seuil / Science ouverte
 - “The Tipping Point” Malcolm Gladwell - Back Bay Books (Français : “ Le point de bascule”)
- Stratégies
 - Strategy as structured chaos – Shona L.Brown Kathleen M.Eisenhart
- Changement de paradigme
 - « *La structure des révolutions scientifiques* » - Kuhn T. S. - Flammarion