

Initiation à l'Approche de la complexité

Présentation au Rotary Club Paris Concorde le 29 avril 2010

Michel Bloch mbloch@mountvernon.fr



Merci de m'accueillir dans votre groupe et de me donner ainsi l'occasion de m'exprimer sur l'Approche de la complexité.

Ma passion pour ce sujet m'a conduit à créer un groupe de travail, Emergence Paris¹, qui a tenu sa 46ème séance de travail ce mois-ci.

M'étant essayé à appliquer cette approche à l'enrichissement des techniques de marketing, j'ai acquis la conviction qu'un éclairage inédit et une attitude nouvelle sur des sujets connus étaient intéressants, ainsi pour le marketing :

- La relation dite « client/fournisseur » se trouve enrichie par la considération d'un ensemble de réseaux dans lesquels clients, fournisseurs et influences diverses interagissent entre eux.
- Un prix de marché, est mieux compris en tant qu'émergence provoquée essentiellement par les relations directes ou indirectes entre les divers acteurs.

J'imagine que les membres d'un club éclectique comme le Rotary ont déjà entendu parler, d'une façon ou d'une autre, de concepts liés à la complexité :

- Certainement de crises systémiques et d'effet domino.
- Surement de la phrase bateau : « le tout est plus que l'ensemble des parties »
- Éventuellement de la théorie du chaos et de l'effet papillon, vous savez... ce battement d'aile d'un papillon à Mexico qui peut provoquer une tornade à Washington.
- Et du sociologue français Edgar Morin² pour qui «une vision simplifiée linéaire a toutes les chances d'être mutilante.»

Je vous propose un exposé en deux temps :

D'abord, nous découvrirons les principaux concepts de l'approche des systèmes complexes à travers 7 exemples :

Les animaux en groupe, le régulateur de Watt et une boule de neige, la formation d'un chapelet de boutons, la propagation d'un engouement, la notion de « petit monde », la météorologie et enfin la simulation de la ségrégation sociale.

Je ferai ensuite trois remarques en m'appuyant sur trois questions :

D'où venons-nous ? Où en sommes-nous ? Vers quoi tendons-nous ?

¹ http://www.mountvernon.fr/Sciences_complexite.htm)

² A publié, à partir de 1967, « La méthode » sur la complexité, en six volumes.

I) Abordons donc maintenant nos sept exemples.

1. Les animaux en groupe.

Lorsque nous observons les envolées de dizaines, centaines ou milliers d'oiseaux (ou bien les bancs de millions de poissons) nous admirons l'intelligence supposée de ces petites bêtes.



Fig. 1 Envolée d'oiseaux

En fait, des simulations sur ordinateur montrent qu'il suffit que chaque oiseau obéisse à des règles très simples, par exemple, « toujours garder avec le voisin et avec tout obstacle une distance constante ». Cette règle est naturelle puisqu'elle diminue deux risques : les collisions et les attaques de prédateurs.

Et alors... sans intelligence particulière... et sans plan global... les pseudo-oiseaux évoluent gracieusement sur l'écran de l'ordinateur et, comme dans le ciel, se divisent en deux groupes lorsqu'ils croisent un poteau, pour se regrouper ensuite.

Les insectes sociaux et en particulier les fourmis, ont beaucoup inspiré les chercheurs en systèmes complexes. Toujours sans chef - la reine n'étant qu'une pondreuse et non un chef - et toujours sans plan directeur, une vie sociale se développe et un habitat sophistiqué est construit.

Regardons le cas simple du choix parmi deux sources de nourriture de celle qui est la plus proche. Si au départ deux chemins sont possibles, les fourmis vont prendre l'un ou l'autre selon une probabilité voisine de 50%. Les fourmis déposent un produit, la phéromone, et elles tendent à adopter le chemin dans lequel cette odeur est la plus forte. Celles qui prennent le chemin le plus court feront l'aller-retour plus souvent que les autres et le chemin le plus court sera ainsi plus chargé en phéromone. Les fourmis progressivement adopteront le chemin le plus court, sans avoir procédé à aucune mesure et sans s'être concertées.

Du comportement de ces petites bêtes retenons quatre idées :

→ En premier lieu, un système complexe est composé d'un certain nombre d'agents autonomes qui interagissent entre eux, avec leur environnement et avec l'état du système qu'ils ont contribué à créer.

→ Ensuite, que des règles simples d'interaction locales entre des agents font émerger des comportements complexes au niveau global. Ici les agents sont des oiseaux ou des fourmis, ils pourraient aussi bien être des consommateurs, des cellules vivantes, des voitures sur autoroute...

→ L'analyse des processus conduisant à la découverte par les fourmis de la source de nourriture la plus proche, illustre bien le fait qu'une « intelligence collective » supérieure à celle de chacun des agents apparaît au sein des systèmes complexes. Ceci a été confirmé par des mesures du temps de découverte du chemin de sortie d'un labyrinthe qui est en moyenne très inférieur pour les groupes que pour les individus seuls.

→ Notons que certains systèmes complexes, comme une fourmilière ou une ville, ont la capacité de s'auto organiser à partir d'interactions simples.

2. Le régulateur de Watt :



Fig. 2 Régulateur de Watt

Ce dispositif était utilisé pour éviter que les machines à vapeur s'emballent ou s'étouffent.

Un mécanisme, entraîné par la machine, tourne plus vite lorsque la machine va plus vite et ralentit avec elle. Par un système articulé, la force centrifuge relève ou laisse redescendre les bras ce qui actionne une soupape qui ralentit la machine lorsqu'elle tend à aller trop vite, et l'accélère dans le cas contraire.

C'est ce que Norbert Wiener - l'inventeur de la cybernétique - a baptisé rétroaction négative qui a pour effet de contrôler le système et de maintenir le fonctionnement à l'intérieur de limites acceptables.

Il existe aussi des rétroactions positives qui, au contraire, amplifient les phénomènes.

La meilleure illustration en est la boule de neige qui, une fois mise en mouvement sur une pente enneigée, grossit par accréation, donc s'alourdit, donc roule encore plus vite, donc grossit encore plus rapidement. Sa vitesse et sa masse augmentent jusqu'à ce qu'un événement extérieur interrompe le mouvement.

→ Retenons que le fonctionnement des systèmes complexes est basé sur des interactions entre agents qui sont en fait des rétroactions négatives et positives.

→ En réalité, dans un système complexe, il y a de nombreuses boucles de rétroactions positives (amplification) ou négatives (contrôle) ce qui leur donne, dans l'ensemble, un comportement imprévisible.

3. Passons à la propagation d'un engouement en l'illustrant par une histoire vraie

Une société américaine s'appêtant à arrêter sa chaîne de fabrication de chaussures en daim très démodées, a appris brutalement que ces chaussures avaient été portées par des designers newyorkais, dans un salon de San Francisco.

Ces designers newyorkais ayant beaucoup de contacts dans des milieux branchés de toutes les grandes villes, étaient ce qu'il est convenu d'appeler des *connecteurs*. C'est-à-dire des personnes ayant beaucoup de relations (ou liens) ; ils étaient de plus crédibles pour fixer les tendances de la mode.

La demande pour ces chaussures démodées s'est emballée et, non seulement la société n'a pas arrêté la fabrication, mais elle a dû réinvestir pour faire face à la demande.

C'est une rétroaction positive qui a entretenu et accéléré la propagation de la mode de ces chaussures.

→ Retenons que pour la propagation d'engouements, de rumeurs, de modes ou de virus dans un réseau social ou informatique, les *connecteurs* ont un rôle clé. Ainsi, lors d'une épidémie, ce sont eux qu'il faut vacciner en priorité et, pour lancer un produit ou une idée, ce sont eux qu'il faut cibler.

4. Passons à l'expérience dite des boutons en vrac dans un panier

Tirez un bouton au hasard, attachez le par un fil à un autre bouton également pris au hasard et remettez le tout dans le panier. Recommencez l'opération autant de fois que nécessaire.

Pendant un certain temps, vous tirerez parfois des boutons isolés et parfois des chapelets de boutons.

Mais, lorsque le nombre de liens est le double du nombre de boutons dans le panier, presque tous les boutons se trouvent reliés en un seul long chapelet.

→ La leçon est que les systèmes complexes peuvent être le siège de changements rapides pour une variation très faible d'un paramètre autour d'un « point de bascule » et que ceci a des conséquences en général imprévisibles qui peuvent éventuellement être graves.

Nous connaissons bien ce phénomène de point de bascule ou de changement de phase avec la transformation de la glace en eau à 0° et de l'eau en vapeur à 100°.

5. L'humanité avec 6,5 milliards d'individus est ce que l'on appelle un « petit monde »

Une expérience sociologique a montré que pour qu'un individu quelconque entre en contact avec tout autre individu, 5 intermédiaires suffisaient, soit une distance entre eux de 6 liens. Le réseau formé par l'humanité n'a pas une structure quelconque, en particulier, ce n'est pas un réseau aléatoire, c'est un réseau qui a une faible quantité de liens distants et beaucoup de liens de proximité. Ce résultat a depuis été confirmé mathématiquement. De là vient l'expression « 6-degree-of-separation » qui a même servi de thème à une pièce sur Broadway.

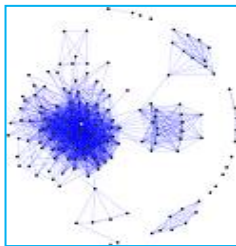


Fig. 3 Réseau social

La même propriété « petit monde » s'applique à de nombreux réseaux, dans des domaines très différents, tels que les réseaux sociaux, l'Internet, les neurones, les réseaux de transport ou de distribution d'électricité. Ainsi, l'Internet – réseau physique – a une distance moyenne entre nœuds de 21 et avec 25 milliards de pages, le Web a une distance moyenne entre pages de 19.

→ Retenons de cet exemple que les réseaux complexes sont souvent des « petits mondes » avec des comportements qui paraissent contraire à l'intuition.

6. Simulation météorologique

En 1967, Edward Lorenz a fait une simulation météorologique sur ordinateur avec des paramètres comportant 10 chiffres après la virgule. Il l'a refaite en repartant des résultats imprimés à mi-course et donc avec une précision plus faible et, surprise ! Malgré un très faible écart sur les paramètres, il a trouvé un résultat – une situation météorologique – totalement différent du précédent.

→ Ceci illustre la **sensibilité** des systèmes complexes **aux conditions initiales**, c'est à dire aux détails infimes, et explique pourquoi des phénomènes comme la météorologie ne sont prévisibles que sur une période relativement courte.

7. Pour finir, une simulation de la ségrégation sociale pour une population rouge et une population bleue.



Fig. 4 Ségrégation urbaine

Deux paramètres seulement sont utilisés : le pourcentage de logements occupés et, la préférence des individus, exprimée en pourcentage minimum souhaité de voisins semblables à la famille considérée. Si ce minimum désiré n'est pas atteint, la famille déménage, si elle le peut, vers un « meilleur » voisinage.

Le résultat est étonnant, dès une préférence d'apparence raisonnable de 20%, une ségrégation très forte apparaît très rapidement sur l'écran avec

de grosses tâches toutes rouges séparées de très grosses tâches toutes bleues.

→ Retenons de cet exemple que des simulations simples basées sur des interactions entre agents, peuvent donner des idées aux spécialistes, sur des problèmes très difficiles.

Des sept cas ci-dessus retenons quatre idées :

→ Les systèmes complexes sont constitués d'agents autonomes en interaction entre eux, en interaction avec leur environnement et, également, en interaction avec le système qu'ils ont contribué à créer et dont ils font partie.

→ Des règles simples d'interaction au niveau local peuvent donner des émergences très complexes au niveau global. Parmi les émergences, nous avons déjà cité « l'intelligence collective », l'auto-organisation, les caractéristiques « petit-monde » et les propagations dans un réseau.

→ La caractéristique symptomatique des systèmes complexes est leur extrême sensibilité aux conditions initiales. Ceci a pour conséquences un horizon de prévision limité dans le temps à l'instar des prévisions météorologiques, et, que de petites causes peuvent avoir de grands effets

→ Deux méthodes sont très utilisées pour l'étude de tels systèmes : la simulation à base d'agents et la théorie des réseaux complexes

II) Terminons avec trois observations :

1. D'où venons-nous pour l'approche des systèmes complexes?

Depuis 1637, avec Descartes, nous vivons avec un modèle de compréhension du réel - un paradigme³ - que l'on appelle le réductionnisme.

Souvenez-vous, dans le *Discours de la Méthode*, « *Le second principe consiste à diviser chacune des difficultés que j'examinerais, en autant de parcelles qu'il se pourrait, et qu'il serait requis pour les mieux résoudre*⁴. » Ce principe de Descartes a permis de faire des découvertes absolument fantastiques pendant trois siècles, mais a aussi atteint ses limites tout particulièrement en biologie, en écologie et en sociologie..

Le nouveau paradigme du XXI^{ème} siècle, appelé holisme⁵, considère un système dans son ensemble et donne une importance prépondérante aux liens entre les parties.

L'étude scientifique de la complexité est nouvelle mais elle éclaire des interrogations très anciennes :

Au 17^{ème} siècle, **Blaise Pascal** disait déjà que pour comprendre le tout, il faut comprendre les parties et que pour comprendre les parties, il faut comprendre le tout⁶.

³ Ensemble de notions, de conceptions, de valeurs, de croyances qui servent de grille d'analyse de la réalité. Un changement de paradigme influe directement sur la vision et l'explication de la réalité.

⁴ Ceci dit, Descartes était loin d'être un réductionniste absolu.

⁵ Holistique (néologisme) : approche de la réalité comme un tout global, au lieu de la voir comme la somme des différentes parties qui la composent.

⁶ « Donc toutes choses étant causées et causantes, aidées et aidantes, médiates et immédiates, et toutes s'entretenant par un lien naturel et insensible qui lie les plus éloignées et les plus différentes, je tiens impossible

C'était déjà une invitation à combiner la méthode réductionniste – Analyser en détail les parties d'un problème, comme le recommandait Descartes - et holistique – Etudier les l'ensemble du système, comme le préconise l'approche de la complexité.

La biologie moderne, prototype de cette double approche, progresse grâce, d'une part, à des recherches au niveau microscopique pour découvrir le fonctionnement des cellules et, d'autre part, à des études globales de l'organe ou de l'organisme pour donner un sens à ces découvertes.

Adam Smith, dès 1776, dans *La Richesse des Nations*, avec sa *main invisible*, eût l'intuition qu'une régulation de l'économie émergeait à partir d'actions individuelles d'acteurs ne se souciant pas de l'ensemble⁷.

Dés 1934, **Gaston Bachelard** disait « Il n'y a rien de simple, il n'y a que du simplifié ».

L'étude scientifique des systèmes complexes est issue de deux ruptures scientifiques et d'une rupture technologique :



Fig. 5 Henri Poincaré

En 1890, **Henri Poincaré**, le très grand savant français, a démontré, que lorsque l'on passe de deux à trois corps célestes, les lois totalement déterministes de Newton, produisent des trajectoires chaotiques et instables. L'imprévisibilité s'est alors glissée dans la mécanique rationnelle.

De 1935 à 1970, plusieurs savants ont fait progresser considérablement la notion d'information au sens large : **Norbert Wiener** avec la cybernétique, **Turing** la théorie du calcul, **Von Neumann** la théorie des jeux, les automates reproductibles et les automates cellulaires, **Bertalanffy** la théorie des systèmes ou systémique.

Peu de temps après, dans le dernier quart du 20^e Siècle, l'**informatique** personnelle puissante et interactive a permis d'étudier, par simulation, deux types de problèmes que l'on ne pouvait pas traiter jusque là :

- Problèmes conduisant à des équations impossibles à résoudre, comme dans le cas des 3-corps, cité ci-dessus.
- Problèmes que l'on ne peut même pas mettre en équation comme souvent en écologie, en sociologie, en biologie ou en médecine.

En simplifiant, disons que l'ordinateur a apporté à l'étude des systèmes complexes, l'équivalent de ce que la lunette de Galilée avait procuré à l'astronomie et à la mécanique.

2. Où en sommes-nous ?

Soyons clairs, il ne s'agit pas encore d'une théorie ; en effet :

- Il n'y a pas un principe général éclairant les diverses applications et découvertes.
- De plus, les concepts utilisés ne font pas l'objet de définitions universellement reconnues. Ainsi, le mot *émergence*, si souvent utilisé, est l'objet de multiples interprétations scientifiques et philosophiques.

de connaître les parties sans connaître le tout, non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties.»

⁷ Son erreur a été de croire que le résultat était toujours positif, alors que les crises montrent qu'il n'en est rien.

Il s'agit d'abord d'une nouvelle attitude consistant à penser systèmes et relations entre les agents et à ne pas imaginer qu'il existe toujours un contrôle centralisé et un plan à priori.

C'est ensuite une panoplie de concepts, de méthodes et d'outils très riches permettant de progresser sur des questions difficiles. Nous avons évoqué les propriétés des réseaux

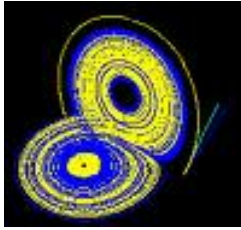


Fig. 6 Attracteur étrange de Lorenz

complexes et les simulations basées sur des agents mais il existe des outils plus mathématiques, que nous ne traiterons pas aujourd'hui, tels que les fractales, les fonctions non-linéaires, **les attracteurs**, les paysages **d'aptitude**, **les automates cellulaires**, les algorithmes génétiques, les distributions de probabilité dites « **sans échelles** » telle que la loi de puissance...

Cette discipline, bien que récente, est déjà extrêmement féconde dans pratiquement tous les domaines scientifiques : biologie (amélioration du darwinisme), médecine (cancer...), écologie, géographie, sciences sociales, économie, marketing, physique et chimie...

Elle a également un apport déterminant pour des études techniques comme le trafic automobile, l'évacuation d'immeubles, la maîtrise des épidémies, l'optimisation des télécommunications, la conduite de grands projets, l'urbanisme, les feux de forêts...

Ce qui a beaucoup surpris les chercheurs, c'est que des règles similaires s'appliquent dans des domaines si différents. Ainsi, les règles des réseaux complexes s'appliquent aux organismes vivants, aux réseaux sociaux, à l'Internet, aux écosystèmes...

3. Vers quoi tendons-nous ?

Depuis 1890, nous sommes passés de la certitude à l'incertitude, ce grand désarroi introduit par la complexité, mais également par la mécanique quantique avec le principe d'incertitude d'Heisenberg et par les théorèmes d'incomplétude de Gödel.

Avec la complexité, nous évoluons de la causalité stricte linéaire à la causalité partielle et bouclée, du prévisible à l'imprévisible et nous découvrons que des comportements chaotiques sont fréquents et que de petites causes peuvent avoir de grands effets.

Cependant, très souvent nous continuons à limiter nos analyses aux sciences exactes qui pourtant ne concernent que la très petite partie des phénomènes qui fonctionnent simplement et donc de façon prédictible.

Les responsables politiques n'ont pas encore intégré ce changement de perspective alors que presque toutes leurs décisions portent sur des situations de plus en plus complexes : crise socio-économico-financière, épidémies, terrorisme, réchauffement climatique, émeute dans les banlieues ou dans les stades, disparition des espèces... Les principaux outils qui sont mis à leur disposition reposent sur la simplicité et l'intuition ; ce sont de mauvaises conseillères pour les systèmes complexes dont les réactions sont souvent contre-intuitives, chaotiques et imprévisibles.

En réalité, c'est un formidable et difficile effort de compréhension qui serait indispensable pour intégrer les concepts des systèmes complexes.

De nombreux jeunes chercheurs et universitaires utilisent déjà ces nouveaux concepts dans des thèses ou dans des projets. L'espoir vient donc, comme toujours, des générations futures, car comme le disait Heisenberg « *qui possède la jeunesse, possède l'avenir* ».

Je vous remercie pour votre exceptionnelle attention. Je suis maintenant disposé à essayer de répondre à vos questions ou à écouter vos remarques.

Questions de l'assistance:

1. Q : Est-ce que l'essentiel n'est pas la sensibilité aux conditions initiales ?

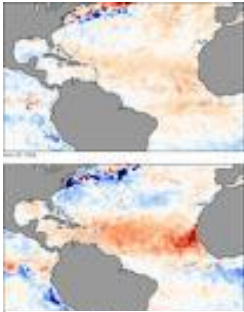


Fig. 7 Météorologie - Conditions initiales

Oui, c'est la signature, la caractéristique symptomatique des systèmes complexes et du chaos. L'on peut aussi parler de sensibilité aux infimes détails ; ce qu'il ne faut pas oublier, c'est que tout état du système à un instant donné est une « condition initiale » pour la suite de l'évolution de ce système. Autrement dit, si pour deux essais l'on arrivait à reproduire exactement les conditions initiales avec une précision absolue – hypothèse très improbable - elles ne conduiraient pas aux mêmes états du système puisque, ultérieurement, des perturbations infimes mais différentes, dans les deux essais suffiraient à modifier l'évolution du système d'une façon très significative.

2. Q : L'incertitude est-elle inhérente à la nature ou est-elle la manifestation de notre ignorance ?



Fig. 8 Einstein & Bohr

C'est la grande question tant philosophique que scientifique, elle fait l'objet de nombreux débats. Elle se pose d'ailleurs également pour la mécanique quantique⁸. Formulée par les philosophes, la question devient : cette incertitude est-elle ontologique (dans la nature des choses) ou épistémologique (liée à notre ignorance) ?

Je ne peux pas répondre à cette interrogation avec autorité. Cependant, ma position personnelle et intuitive pour ce qui concerne les systèmes complexes, est que - s'il peut y avoir des cas où des progrès scientifiques ultérieurs rendent prévisibles ou explicables des phénomènes qui paraissaient imprévisibles et incertains - en général l'incertitude est ontologique et donc irréductible.

En guise d'un au-revoir :

A mon avis, le paradigme de la complexité va marquer profondément tout le XXIème Siècle. J'espère vous avoir donné envie d'approfondir cette nouvelle façon d'appréhender le réel, peut être avec la bibliographie jointe.

⁸ Cf. La longue querelle Albert Einstein / Niels Bohr qui aboutit à une rupture définitive entre les deux génies.

Référence :

En français

- http://www.mountvernon.fr/Sciences_complexite.htm
- « *La systémique* » Daniel Durand ; Éd. Que sais-je ?
- « *Introduction à la pensée complexe* » Edgar Morin ; Éd. Points
- « *La complexité - Vertiges et Promesse – 18 histoires de science* » Réda Benkiriane ; Éd. Poche Le Pommier

En anglais

- « *Complexity – A guided Tour* » Melanie Mitchell ; Ed. Oxford
- « *Simplexity – Why simple things become complex (and how complex things can be made simple)* » Jeffrey Kluger ; Ed. Hyperion
- « *At Home in the Universe – The search for the laws of Self-Organization and Complexity* » Stuart Kauffman ; Éd. Oxford University Press

Sur l'incertitude

- « *From certainty to uncertainty – The Story of Science and Ideas in the Twentieth Century* » F. David Peat ; Ed. Joseph Henry Press

Les images prises sur *Google Image* sont « Labeled for reuse »

“Results will only include images labeled with a license that allows you to copy and/or modify the image in ways specified in the license.”

Envolée d'oiseaux : www.freefoto.com/images/01/47/01_47_42---Floc...

Régulateur de Watt : commons.wikimedia.org/wiki/File:Catalonia_Ter...

Réseau social : commons.wikimedia.org/wiki/File:Sna_large.png

Henri Poincaré ; commons.wikimedia.org/wiki/File:JH_Poincare.jpg

Attracteur de Lorenz : commons.wikimedia.org/wiki/File:Lorenz_caos3-...

Réchauffement climatique : en.wikipedia.org/wiki/File:Global_Warming_Map.jpg

Conditions initiales : visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=17564

Einstein & Bohr : flickr.com/photos/blatantnews/4013854626/