

Révision des concepts pour l'étude des émergences dans les systèmes complexes

Section 2 : Propriétés des systèmes complexes, Lois des systèmes complexes adaptatifs

Plan

Section 1

- 1) Objectif de ce document
- 2) Résumé
- 3) Les systèmes complexes

Section 2

- 4) Propriétés des systèmes complexes
- 5) Lois des systèmes complexes adaptatifs

Section 3

- 6) Les outils

Section 4

- 7) Exemples d'applications

Section 5

- 8) Conséquences philosophiques
- 9) Mathématiques et complexité
- 10) Lexique

4) Propriétés des systèmes complexes

- Emergence
- Auto-organisation
- Coévolution
- Point de basculement
- Feed-back
- Fractals
- Loi de puissance

4-1) Emergence

- **Définition : Résultat des interactions des agents (objets) d'un système :**
 - entre eux
 - avec leur environnement
 - avec ce résultat (l'émergence en cours de création peut interagir avec les agents et contribuer ainsi à sa propre création)
- **Les émergences sont de nature variées :**
 - Evolution des agents (évolution des espèces dans un écosystème, évolution des structures dans un système économique)
 - Apparition de nouveaux agents
 - Modification de l'environnement (par exemple création d'habitats par des sociétés humaines ou des colonies d'insectes)
 - Evolution des relations entre agents (auto organisation, co-évolution)
 - Phénomènes mentaux (par exemple engouement collectif pour une mode)
 - Phénomènes mathématiques (loi de puissance pour la distribution de la dimension d'objets, des intervalles de temps entre des événements)
- **Les propriétés surprenantes des émergences sont dues aux structures en boucles des réseaux d'interactions (feedback, rétroaction)**

4-1) Émergence (suite)

Exemples d'émergences

Agent	Interaction	Emergence
Insecte colonial	Intensité des odeurs (phéromones)	Fourmilière,
Animal grégaire	Vue, Ouïe	Vols groupés d'oiseaux, bancs de poissons
Consommateur	Directe : imitation Indirecte : impact de la demande sur l'offre	Prix de marché Engouement
Particule	Règles de la physique des atomes et particules élémentaires	Pression, température, courant électrique...

4-1) Émergence (suite)

- **Pas de règles rigoureuses pour donner l'appellation d'émergence à la production d'un système. Quelques règles de bon sens :**
 - **Caractère surprenant**
 - **Imprévisibilité**
 - **Difficulté d'analyse du processus de création de l'émergence, des causalités**
- **Interprétation subjective.**
 - **Si les capacités de traitement du cerveau humain étaient plus puissantes des phénomènes classés dans le domaine de l'émergence seraient considérés comme normaux**
 - **« L'émergence c'est quand je la vois »**

4-1) Émergence (suite)

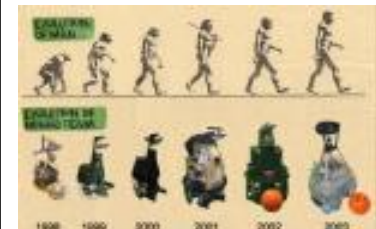
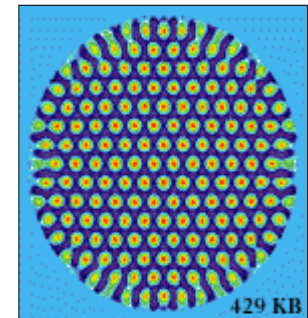
- **Des règles très simples de comportement des agents peuvent engendrer des émergences complexes et surprenantes :**
 - **Le suivi des traces de phéromones permet aux souris de trouver les chemins les plus courts dans leur quête de nourritures**
- **Les émergences possèdent des caractéristiques tout à fait nouvelles vis-à-vis de celles des agents qui les ont créés :**
 - **Les températures et pressions des gaz sont engendrées par les interactions entre des molécules qui, isolées, n'ont ni pression , ni température**
- **Les outils mathématiques et les lois physiques sont impuissantes à prévoir les émergences en raison des difficultés de mise en équation variété des agents, boucles d'interaction et non linéarités dans les relations de cause à effets**
- **La simulation informatique du comportement des agents permet de faire des progrès considérables dans l'analyse des émergences.**
 - **Etude de l'impact des règles de récompenses sur le comportement d'un groupe de personnes (règles d'attribution des primes dans une entreprise)**
 - **Etude de l'impact des lois d'urbanisme sur l'évolution d'une ville**

4-1) Émergence (suite)

- La non linéarité des systèmes complexes peut entraîner une extrême sensibilité aux **conditions initiales** de leurs émergences (formes, amplitude, instant d'apparition...) d'où une imprévisibilité
 - Equation de Lorenz et effet papillon
- Les systèmes complexes sont :
 - **Déterministes** pour mathématiciens parce qu'ils sont régis par des équations avec des conditions initiales précisément définies
 - **Indéterministes** pour les physiciens :
 - Extrêmes sensibilité aux conditions initiales
 - Impossibilité de définir exactement l'ensemble des conditions initiales

4-2) Auto organisation

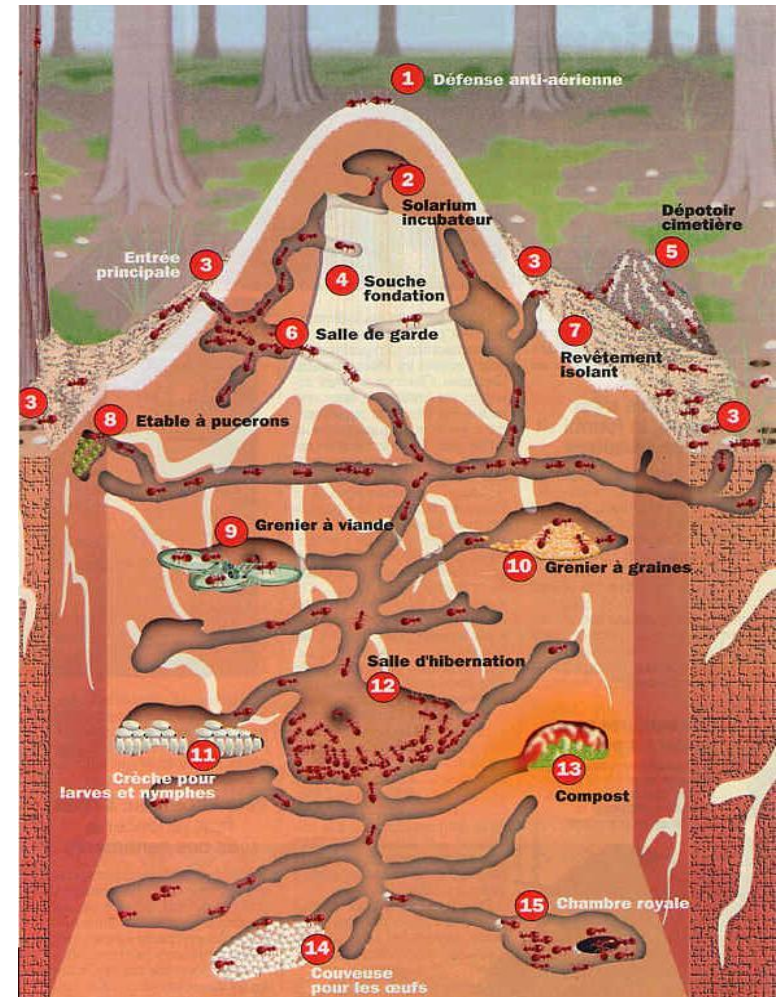
- **Ex. fourmilière, ville**
 - Émergence spontanée d'ordre engendrée par des agents qui interagissent entre eux
 - Diversité d'agents et évolution du nombre d'agents
 - Autonomie (comportement de l'agent contrôlé par son action) + évolutif
- **Caractérisée par des formes**
 - + ou – répétitives et + ou – régulières
 - Organisation des villes
 - Cellules de Bénard
- **Darwinisme + complexité**
 - Auto-organisation : définit les formes possibles
 - Sélection : affine le choix des formes les plus aptes



4-2) Auto organisation (suite)

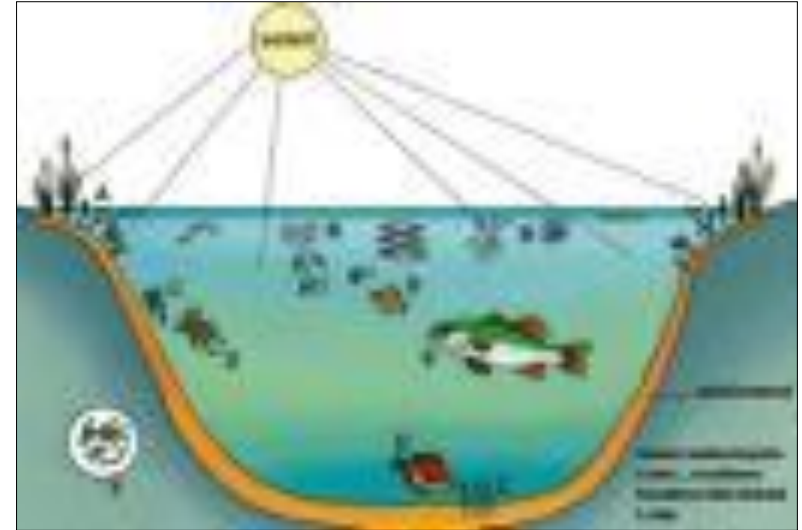
Exemple de la fourmilière : ni manager,
ni plan

Souche fondation	Solarium incubateur
Entrée principale	Dépotoir cimetière
Revêtement isolant	Salle de garde
Défense anti-aérienne	Étable à pucerons
Crèche	Grenier à graines
Compost	Salle d'hibernation
Chambre royale	Couveuse



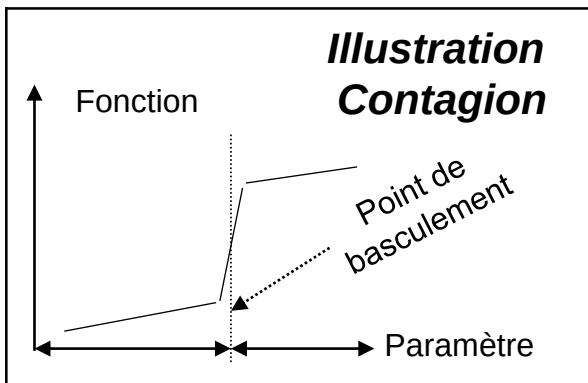
4-3) Co-évolution

- 2 ou plusieurs agents (ou sous-systèmes) ont une influence réciproque significative sur leurs évolutions respectives
- Elle est partout
 - Insectes vivant des produits du figuier et aidant à sa pollinisation
 - Acheteurs / vendeurs
 - Couleur d'un caméléon posé sur un miroir
- Gaïa = planète terre: vie / atmosphère / terre
 - Atmosphère créée et régulée par la vie (boucles de feedback)
 - Temp. stable depuis 4×10^9 ans
 - Simulation : monde des marguerites



4-4) Point de basculement

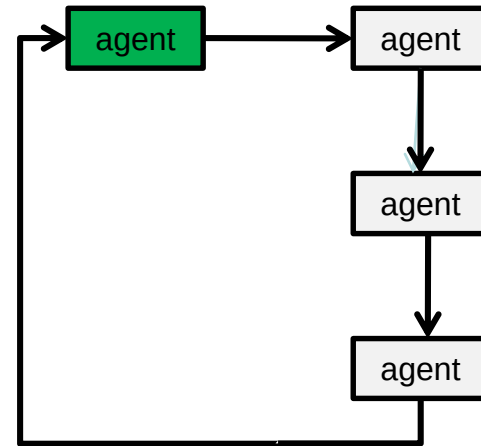
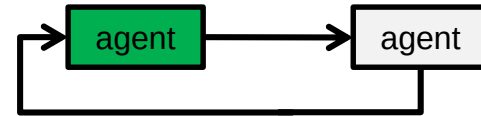
- **État d'un système où une petite cause peut avoir un effet important**
 - Modification continue de la valeur d'un paramètre → changement de phase
- **Lorsque le % de personnes adhérant à une conviction atteint X%, basculement brutal vers une propagation générale : loi de Franck X=30%**
- **Boutons attachés entre eux par tirage au sort :**
 - Lorsque le Nb liens / Nb boutons atteint 0,5 ⇒ presque tous le boutons deviennent soudainement reliés entre eux.
- **Changement d'états solide, liquide ou gazeux à une temp.**



<i>Paramètres de contagion</i>	<i>Commentaires</i>
Loi des quelques uns	Connecteurs
Facteur d'adhérence	La force du message
Puissance du contexte	« The broken windows »

4-5) Feedback (rétroaction)

- Il y a feedback si un agent reçoit un stimuli en réaction à un stimuli qu'il a émis vers un autre agent ou son environnement.
- Les feedbacks peuvent être transmis en cascade sur un circuit bouclé comprenant plusieurs agents et environnements
- Les feedbacks peuvent être :
 - négatifs (régulation, stabilité)
 - positifs (emballement)



4-5) Feedback (rétroaction) suite

- Les interactions dans les systèmes complexes adaptatifs sont des feedback :
 - Réseaux d'interactions complexes et **bouclés**
 - **Chaque interaction est un feedback.**
 - Les interactions sont influencées par l'historique des activités de l'ensemble des agents et de leurs environnement
 - Chaque agent reçoit donc des interactions qu'il a lui même influencées
 - **Les feedback sont générateurs des propriétés des systèmes complexes adaptatifs** : émergence, coévolution, adaptation, auto-organisation...

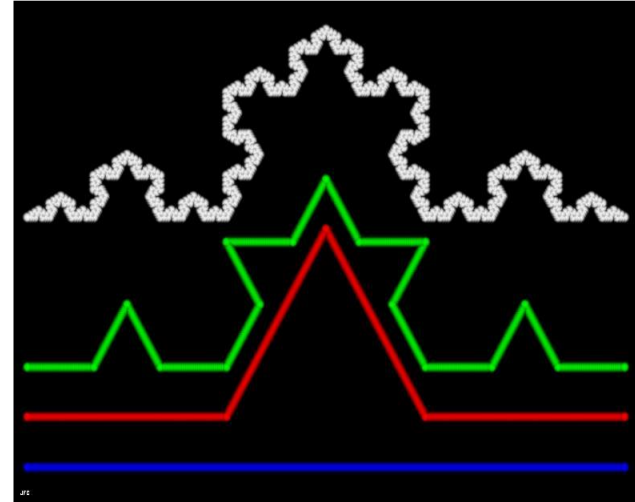
4-6) Fractals

- Les systèmes complexes adaptatifs produisent des objets fractal
- Autosimilarité : zooms successifs sur la figure → même motif
- Exemples :
 - flocons de neige,
 - nuages,
 - pliures du cerveau,
 - cours du coton,
 - courbe de Koch
 - brindille, branche, grosse branche, branche maîtresse, arbre
- Leibnitz : autosimilarité 1700
- Mandelbrot : géométrie fractal 1975

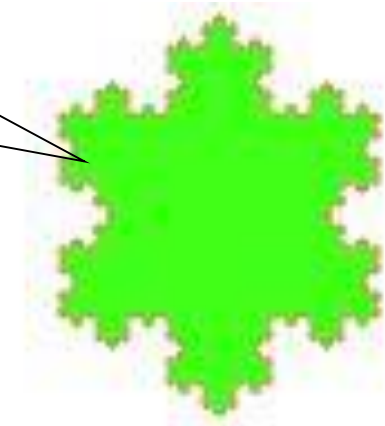


4-6-1) Courbe de Koch

- **Création par processus itératif :**
 - Chaque segment remplacé par une forme de 4 segments
- **Périmètre**
 - Soit $P(n)$ le périmètre de l'itération « n »
 - $P(n+1) = 4/3 * P(n)$
 - Le périmètre tend vers l'infini alors que la surface est à l'évidence finie



Courbe de
Kock à partir
d'un triangle



4-6-2) Propriétés des fractals

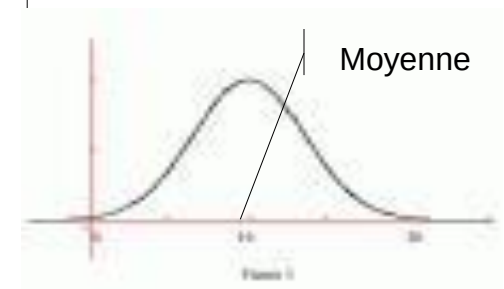
- **Courbes fractales**
 - Longueur infinie
 - Aire nulle ?
 - Dimension fractal comprise entre 1 et 2
- **Surfaces fractales**
 - Aire infinie
 - Volume nul ?
 - Dimension fractal comprise entre 2 et 3
- **La dimension fractale :**
 - Rugosité
- **Exemples :**
 - Les poumons : surface d'environ 70 m²
 - Le cortex du cerveau : surface de plusieurs m²

Calcul de la dimension fractale d'une courbe

- La longueur croît avec la diminution de l'instrument de mesure
- « x » taux de réduction de l'instrument de mesure
- « y » taux d'accroissement correspondant de la longueur
- Dimension fractale
$$1 + (\log y / \log x)$$
- Courbe de Kock
 - pour $x=3$
 - $y=4/3$
 - dimension fractal = 1,26

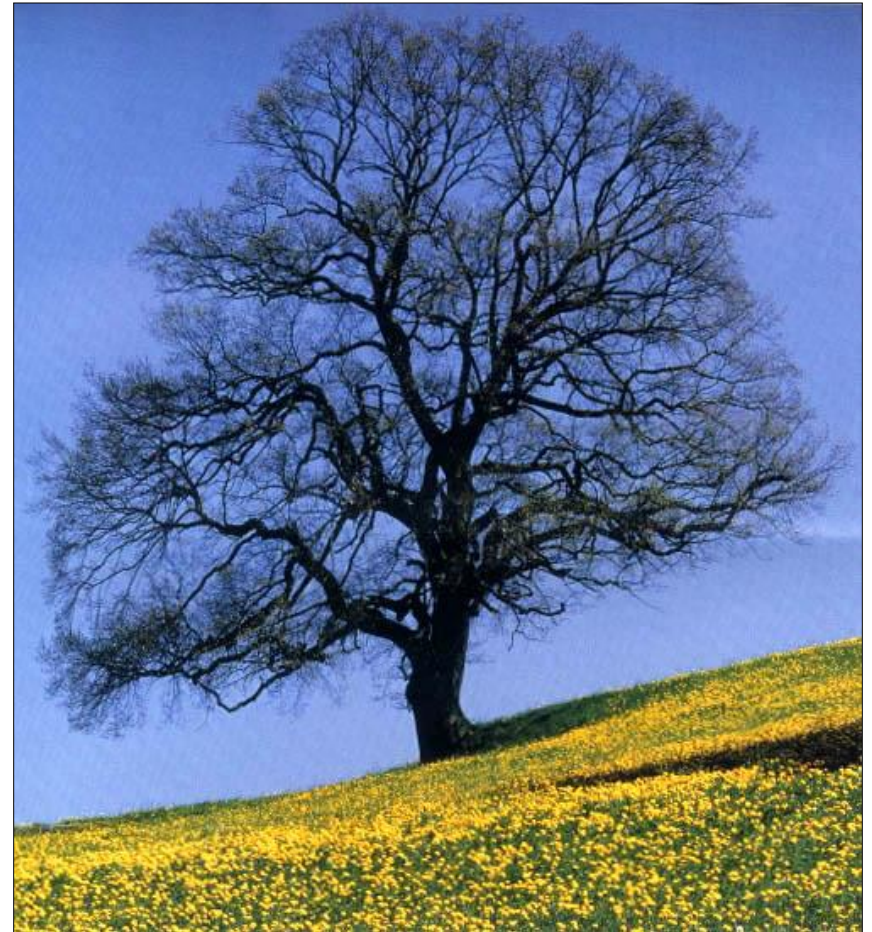
4-7) Loi de puissance

- Loi de puissance (**événements liés**)
 - écarts extrêmement grands (**sans échelle propre** : tous les ordres de grandeur)
 - exemple : population des villes
 - valeur moyenne non significative
 - loi de répartition : $Y = C.X^{-\alpha}$ (différent de e^x)
- Loi de puissance dominante dans les **systèmes complexes adaptatifs** :
 - Richesse des familles (**Pareto**)
 - Population des villes
 - Nombre de visites d'1 site Web
 - Taille des fichiers d'ordinateur
 - Fréquence des mots dans toutes les langues
 - Nombre de disques, de livres vendus
- Phénomènes **indépendants** : **courbe en cloche**
 - Eléments répartis autour d'une **moyenne**
 - **Ex.** taille des individus dans une population (maxi/mini < 5,8)



4-7) Loi de puissance et fractals

- **Les images fractal comportent des distributions en lois de puissance**
 - **Les objets sont d'autant plus nombreux qu'ils sont petits, d'une manière exponentielle.**
 - **Exemple dans un arbre les petites branches sont plus nombreuses. Chaque branche comporte plusieurs branches plus petites.**



5) Lois des systèmes complexes adaptatifs

- Lois générales
- Lois de la théorie du chaos
- Lois de valeur des réseaux d'information
- Exemples de lois des systèmes sociaux
- Les « 9 lois de Dieu »
- Hypothèse de « bord du chaos »

5-1) Lois générales

Source : Stuart Kauffman auteur de « Investigation »

- **Complexité croissante basée sur des combinaisons de structures existantes:**
 - **Biologique : molécules, cellules, êtres vivants...**
 - **Sociales : tribus, communautés, états...**
- **Un système ne peut supporter qu'un nombre limité de type d'agent.**
 - **Au delà de ce nombre, l'introduction d'un nouveau type d'agent entraîne une disparition**
- **Co-évolution des agents**
 - **Interdépendance et enrichissement réciproque**
- **Tropisme des systèmes vers le « bord du chaos »**
 - **Un excès d'ordre entraîne par réaction une évolution vers le désordre**
 - **Un excès de désordre entraîne par réaction une évolution l'ordre**



5-2) Lois de la théorie du chaos

- **Extrême sensibilité aux conditions initiales**
- **Instabilité avec :**
 - **des états d'équilibre temporaire (bassins d'attraction)**
 - **des points de basculement (saut d'un état d'équilibre vers un autre état d'équilibre)**

5-3) Lois de valeur des réseaux d'information

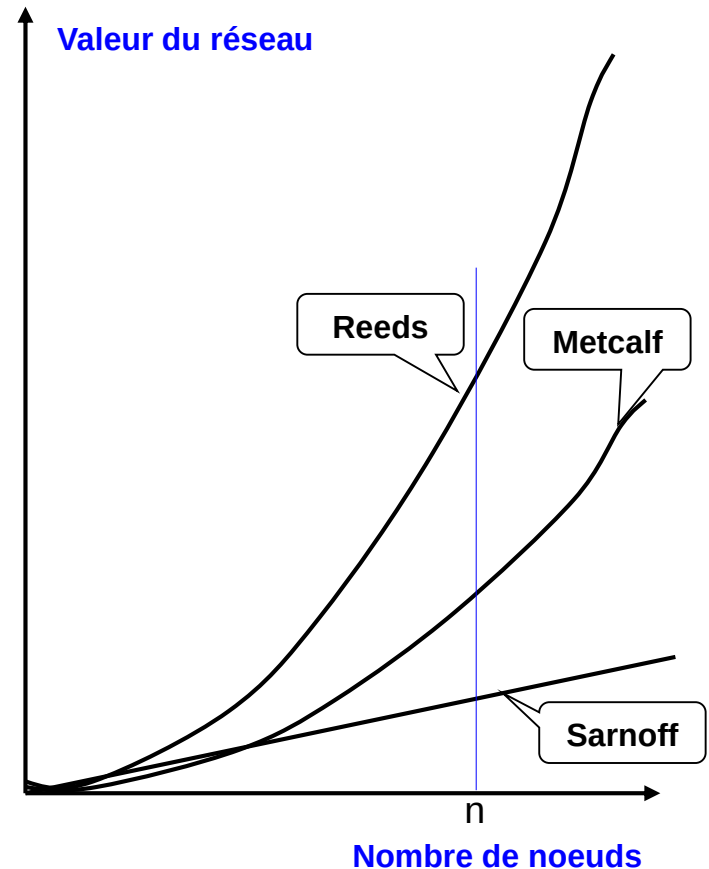


- Réseaux de diffusion
 - Un nœud diffuse simultanément des informations aux autres nœuds
 - **Radio, TV**

⇒ Loi de Sarnoff : $V = k.n$
- Réseaux interpersonnels
 - Chaque nœud envoie sélectivement des informations à d'autres nœuds
 - **Téléphone, fax, e-mail**

⇒ Loi de Metcalf : $V = k.n^2$
- Réseaux communautaires
 - Chaque nœud est un centre d'information accessible par les autres nœuds
 - **ebay, amazon, secondlife, LinkedIn...**

⇒ Loi de Reeds : $V = k.2^n$



5-4)Exemples de lois des réseaux sociaux

- **Théorème de Frank**
 - La perception d'un changement qualitatif dans un ensemble d'éléments ne s'impose à l'esprit que si le nombre d'éléments qui sont changés est de l'ordre de 30 à 40 % du total (et non pas 50%)
 - Emballlement de l'achat des téléphones mobiles lorsque pénétration > 30%
- **Loi de Weber et Fechner**
 - La sensation varie comme le logarithme de la intensité du stimuli qui l'a causée
- **Loi d'imitation**
 - Si n% des personnes de mon entourage ont décidé, je décide la même chose
 - « Le dernier qui a parlé a raison »

5-5) Les « 9 lois de Dieu »

Source : Kevin Kelly auteur de « out of control

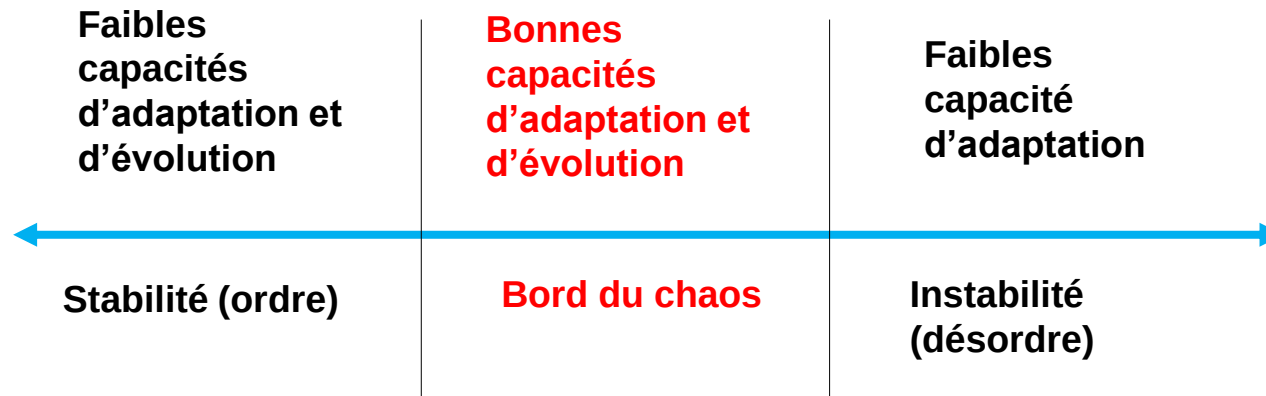
« 9 lois de Dieu » pour faire quelque chose à partir de rien

- **Distribuer les agents**
- **Contrôler de bas en haut**
- **Encourager l'effet boule de neige**
- **Faire croître la complexité à partir d'ensemble simples**
- **Maximiser la diversité**

- **Accepter vos erreurs**
- **Ne pas chercher d'optimum, avoir des objectifs multiples**
- **Chercher un déséquilibre permanent**
- **Changer les changements eux-mêmes**

5-6) Hypothèse du « bord du chaos » - Définition

- Explication du comportement des systèmes complexes adaptatifs par leurs **positionnements sur l'axe stabilité (ordre) – instabilité (désordre)**
- Facteurs agissant sur ce positionnement :
 - Création de liens entre agents : déplacement vers le désordre
 - Les agents obéissent à des règles de comportement communes : déplacement vers l'ordre.



5-6) Hypothèse du « bord du chaos » (suite)

- **Excès de stabilité (ordre) :**
 - le système est insensible aux évolutions de l'environnement.
 - pas d'innovation ni d'émergence.
 - exemple : organisation très procédurière et hiérarchisée.
- **Le « bord du chaos » entre la stabilité (ordre) et l'instabilité (désordre) :**
 - bonnes capacités d'adaptation, d'auto organisation, de création
 - exemple : écosystèmes.
- **Instabilité (désordre ou chaos) :**
 - les perturbation dues à l'environnement provoquent des mouvements désordonnés.
 - pas d'émergence structurée ni d'auto organisation.
 - exemple : communauté désorganisée sans règle ni organisation

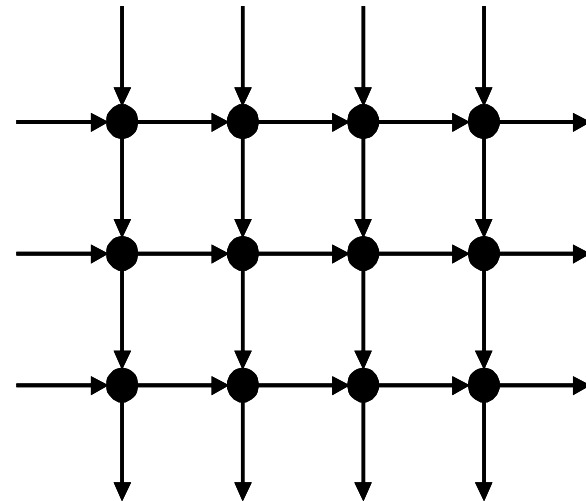
5-6-1) Lois du « bord du chaos »

Source : Stuart Kauffman

- **Tous les systèmes complexes biologiques, économiques, sociologique ... ont un tropisme naturel vers l'état « bord du chaos » propice à :**
 - **l'adaptabilité,**
 - **l'auto organisation,**
 - **la création d'émergences**
- **L'étude des relations entre les gènes dans le génome humain montre que ce dernier se trouve au « bord du chaos »**
- **Il est prudent à ce stade de considérer qu'il s'agit d'une hypothèse**

5-6-2) Les réseaux binaires

- **L'étude des réseaux binaires est à l'origine du concept de « bord du chaos »**
- **Définition : Un réseau binaire est constitué de nœuds et de liens unidirectionnels**
 - **États binaires de chaque nœud: 0 ou 1**
 - **Les nœuds changent simultanément d'états à des instants T_i successifs**
 - **Le nouvel état d'un nœud est fonction de son état et des états des nœuds qui ont des liens dirigés vers lui.**



5-6-2) Les réseaux binaires (suite)

Le comportement d'un réseau binaire suite à une perturbation dépend du nombre moyen « K » des liens vers chaque nœud

- **Basculement du comportement du réseau vers $K=2$:**
 - N = Nombre total de noeuds
 - « n » nombre de nœuds modifiés lors de chaque changement d'état du réseau suite à une perturbation
- **Ces comportements surprenants ont fait l'objet de nombreuses études**
- **Aucune démonstration mathématique**

	Comportement du réseau		
K	<2	Environ 2	>2
Impact d'une perturbation	Très faible $n \ll \sqrt{N}$ n tend vers 0	Émergence de pattern $n = \sqrt{N}$ n constant	Tous les noeuds clignotent $n \gg \sqrt{N}$ n croissant
Les noeuds sont des ampoules	Cessation rapide des clignotements	Clignotement persistant dans certaines zones	Clignotement persistant de tout le réseau