

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

**Section 3 : Les outils**

# 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

## 6) Les outils

|                                            |                                         |                                 |                               |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| <u>Que veut-on faire ?</u>                 |                                         |                                 |                               |
| Quel système :<br>périmètre, composantes ? |                                         |                                 |                               |
| <u>Simulation multi-<br/>agents ?</u>      | <u>Quels outils ?</u>                   |                                 | <u>Bord du<br/>chaos ?</u>    |
| <u>Automates<br/>cellulaires ?</u>         |                                         |                                 | Systèmes<br>neuraux ?         |
| <u>Graphes et<br/>réseaux ?</u>            |                                         |                                 | <u>Morphogénèse?</u>          |
| <u>Intelligence<br/>collective ?</u>       |                                         |                                 | <u>Théorie du chaos<br/>?</u> |
| <u>Mémétique ?</u>                         |                                         |                                 |                               |
| Suites récursives<br>?                     | <u>Itération création<br/>sélection</u> | <u>Création<br/>génétique ?</u> | <u>Logique<br/>du flou ?</u>  |

## 6-1) Que veut-on faire ?

| Types d'objectif                                                   | Exemples                                                         |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>Enrichir</b> les connaissances                                  | Les connaissances du comportement des fourmis d'une fourmilière  |
| <b>Prévoir</b> l'évolution d'un système                            | L'évolution des populations d'un écosystème                      |
| <b>Agir</b> sur un système pour qu'il évolue dans le sens souhaité | Renforcer l'intelligence collective d'une communauté de personne |

## 6-2) Quels outils ?

| Outils                         | Objectifs                                                                                                                                                                                       | Cas d'utilisation                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Simulation multi-agents</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Prévoir les émergences.</li><li>• Connaître le comportement dynamique du système</li><li>• Identifier des interventions</li></ul>                       | <ul style="list-style-type: none"><li>• Exemples : circulation des clients dans un grande surface ; évolution d'une ville</li><li>• Systèmes très dynamiques, agents évolutifs</li></ul> |
| <b>Graphes et réseaux</b>      | <ul style="list-style-type: none"><li>• Avoir une vue synoptique des stimuli reçus par les agents</li><li>• Identifier les propriétés d'un système liées à la structure de son réseau</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Exemple : propagation des engouements, des épidémies.</li><li>• Systèmes peu dynamiques, agents peu évolutifs</li></ul>                          |
| <b>Intelligence collective</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Exploiter les capacités des groupes</li><li>• Aide à la décision</li></ul>                                                                              | <ul style="list-style-type: none"><li>• Travail de groupe</li><li>• Exemples : Communauté Linux, Prévisions</li></ul>                                                                    |

## 6-2) Quels outils ? (suite)

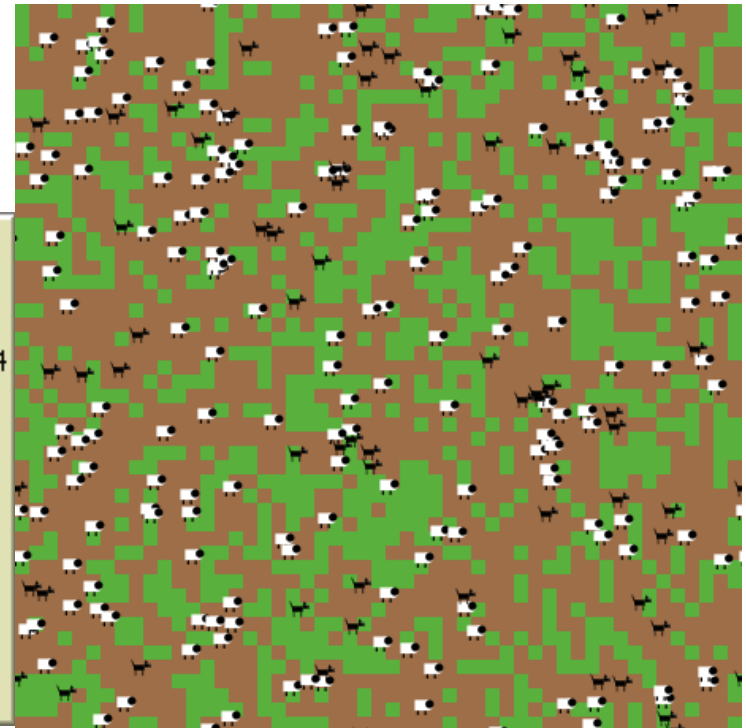
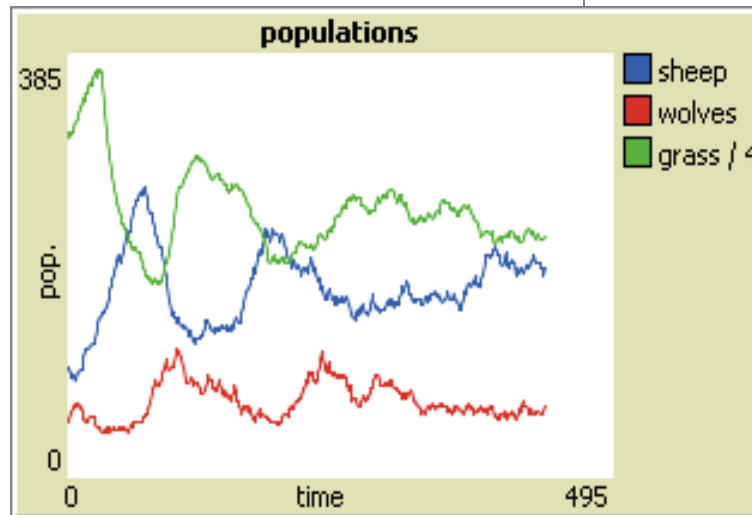
| Outils                                                                   | Objectifs                                                                                                                          | Cas d'utilisation                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Théorie de l'évolution</b><br>(Processus itératif création/sélection) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Créer, innover</li> <li>• Étudier un écosystème</li> </ul>                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Création, innovation dans toutes disciplines: techniques, artistiques, économiques</li> <li>•Étude des systèmes vivants, culturels, sociaux... s'auto organisant</li> </ul>          |
| <b>Reproduction génétique</b>                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Créer des objets à partir d'une population d'objet</li> </ul>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Méthode de création dans le cadre d'un processus itératif de création/sélection</li> </ul>                                                                                           |
| <b>Hypothèse « bord du chaos »</b>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Expliquer le comportement d'un système</li> <li>• Identifier des interventions</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Systèmes trop complexes pour simulation ou théorie des réseaux</li> <li>• Exemple : Systèmes sociaux, économiques</li> </ul>                                                        |
| <b>Théorie du chaos</b> (systèmes d'équations non linéaires)             | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Identifier / prévoir les émergences et les bassins d'attraction</li> </ul>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Systèmes représentés par des équations différentielles (non-linéaires) par exemple : météorologie, Pb des 3 corps</li> <li>•Mal adapté aux systèmes complexes adaptatifs</li> </ul> |

## 6-3) Simulation multi-agents



- La modélisation multi-agents d'un système permet de simuler son évolution à partir de ses éléments appelés agents :
  - Interactions entre les agents
  - Règles de comportement des agents en fonction des interactions

Modélisation proie prédateur (loup, mouton, herbe) : image instantanée



### 6-3-1) Nouvelle approche

| Outils classiques                                                                                                                  | Modélisation multi-agents                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Souvent basés sur des abstractions qui masquent la réalité (par exemple en économie le concept d'équilibre entre offre et demande) | Basée sur les vraies sources de la dynamiques de systèmes : les agents et leurs interactions                                                                                               |
| 1,2 ou infinité d'agents                                                                                                           | 1, 2, 3, 4, ..... n agents                                                                                                                                                                 |
| Agents homogènes                                                                                                                   | Diversité des agents                                                                                                                                                                       |
| Mal adaptés à l'étude des émergences parce que la structure du système est définie lors de la création du modèle                   | Simulation des émergences : auto-organisation, co-évolution, auto adaptation des agents et du système                                                                                      |
| Restrictions sévères quant aux règles de comportement des agents                                                                   | Souplesse d'introduction dans le modèle de règles de comportement des agents, variées et évolutives en fonction de l'historique des interactions avec les autres agents et l'environnement |

### **6-3-2) Principes de fonctionnement**

- **Calcul par itérations successives des évolutions d'un système**
  - **L'état du système à l'instant «  $t_{i+1}$  » est calculé en fonction de l'état à l'instant «  $t_i$  »**
- **Chaque calcul d'un nouvel état concerne :**
  - **Les agents, notamment leurs propres règles de fonctionnement qui peuvent évoluer**
  - **Les stimuli émis par les agents et les environnements**
  - **Les environnements (par exemple ressources disponibles dans un écosystème)**

### **6-3-3) Contributions de la simulation basée sur les agents**

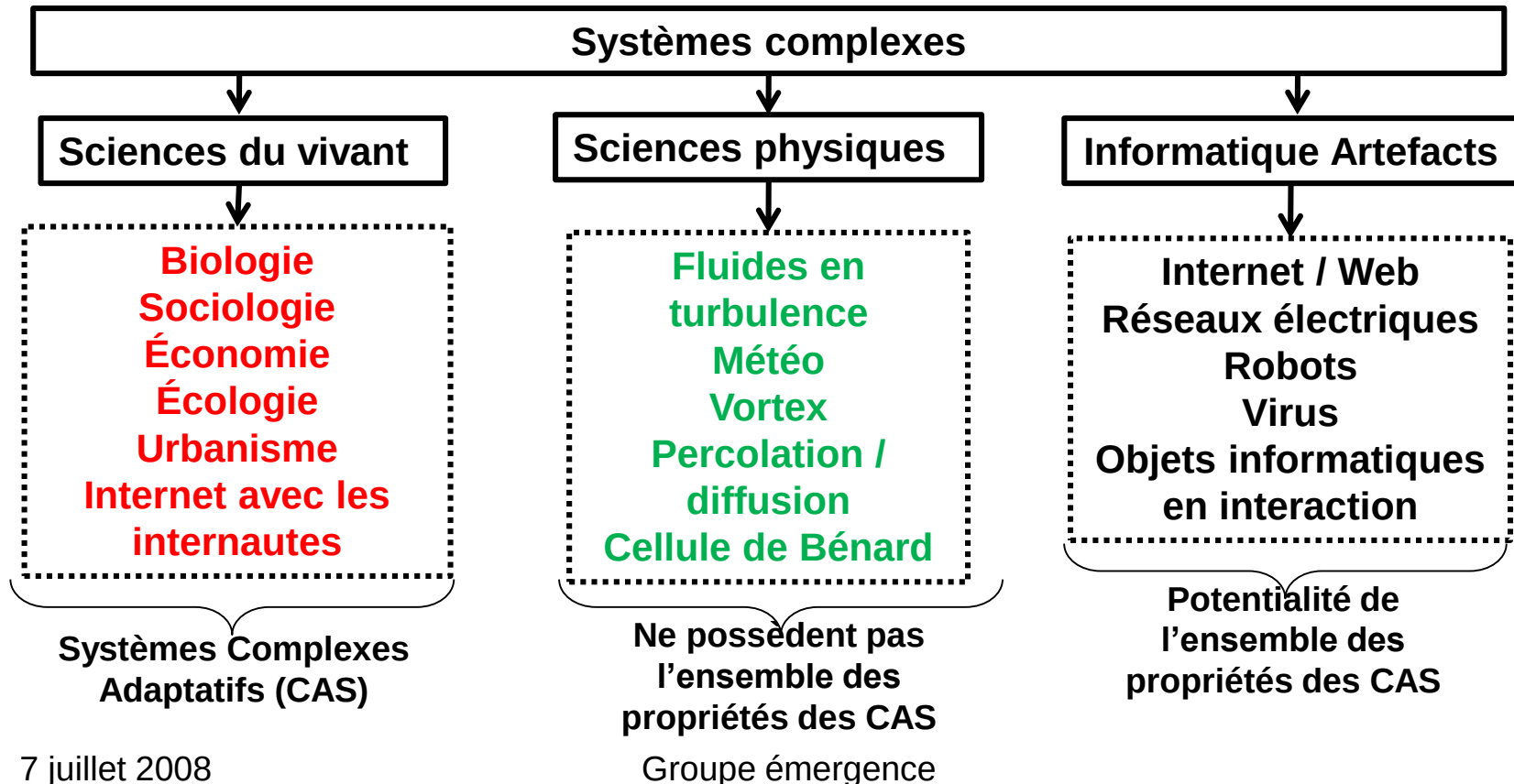
- **Analyse et prévision :**
  - **du comportement dynamique d'un système**
  - **des émergences**
- **Identification des interventions dans un système permettant d'obtenir les évolutions et émergences souhaitées :**
  - **Ajout ou suppression d'agents**
  - **Modification des règles de comportement des agents (sensibilité à des stimuli...)**
  - **Modification de l'environnement**

## 6-3-3) Contributions de la simulation basée sur des agents

Contributions de la simulation **basée sur des agents** à l'étude des systèmes complexes

— Très Importantes dans de nombreux systèmes complexes des sciences du vivant

— Variables de faible à importantes selon les catégories de systèmes complexes des sciences physiques. Souvent faibles.



## 6-3-4) Exemples d'application

- **Démonstration de simulation basée sur des agents**
  - Processus de ségrégation
  - Propagation du Sida en fonction des comportements à risques des individus
  - Rébellion contre une autorité centrale
  - Proie prédateur
  - Autorégulation de la fréquentation d'un bar (El Farol)
  - Feu de forêt
  - **Simulation de l'évolution de la civilisation Anasazi en fonction des conditions d'environnement\***
  - **Processus de découverte du chemin le plus court par des fourmis\***
- **Référence à des cas d'utilisation de la simulation basée sur des agents**
  - **Règles d'attribution des primes aux managers d'une entreprise en vue l'optimisation globale du busines**
  - **Cheminement des clients dans une grande surface en fonction de l'organisation des rayons de produits\*\***

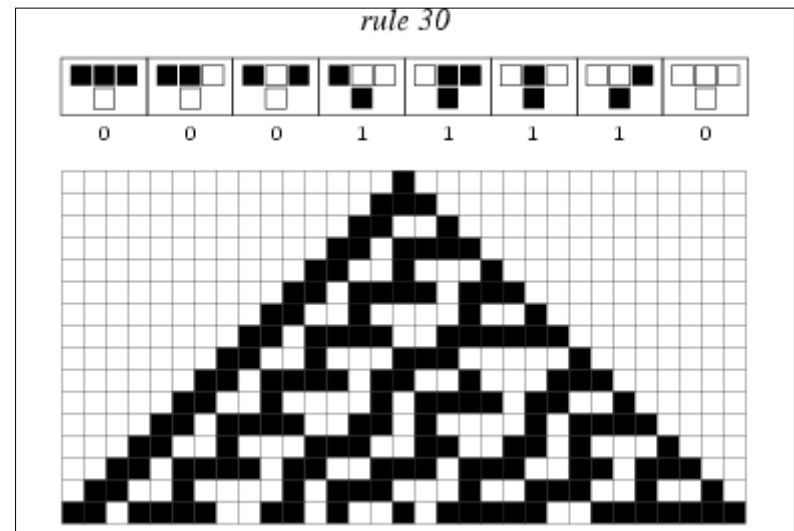
## 6- 3-5) Conclusions

- **La simulation basée sur les agents :**
  - **Permet d'étudier le comportement dynamique de nombreux systèmes complexes de types variés**
  - **Intègre l'ensemble de leurs caractéristiques : réseau des liens d'interactions des agents entre eux et avec leur environnement, règles de comportement des agents...**
- **C'est l'outil roi de l'étude des systèmes complexes adaptatifs qui doit son essor à l'informatique.**

## 6-4) Automate cellulaire

### Forme de simulation multi-agents

- Un automate cellulaire consiste en une grille de cellules :
  - Chaque cellule peut prendre un nombre fini d'états
  - Le nouvel état d'une cellule au temps «  $t+1$  » est fonction de :
    - son état
    - des états de cellules voisines
  - Les changements d'états sont simultanés pour l'ensemble des cellules
  - Une nouvelle génération de cellules est ainsi créée à chaque «  $t+1$  » en fonction des états au temps «  $t$  »



Automate à une dimension. Les lignes représentent les états successifs de l'automate.

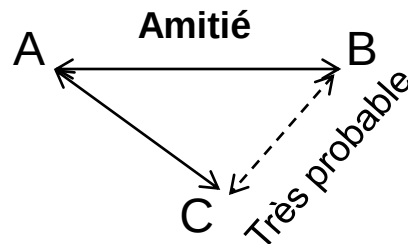
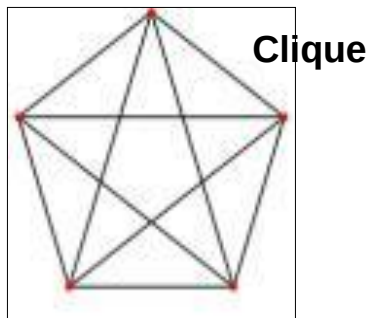
## 6-4) Automate cellulaire (suite)

### Propriétés

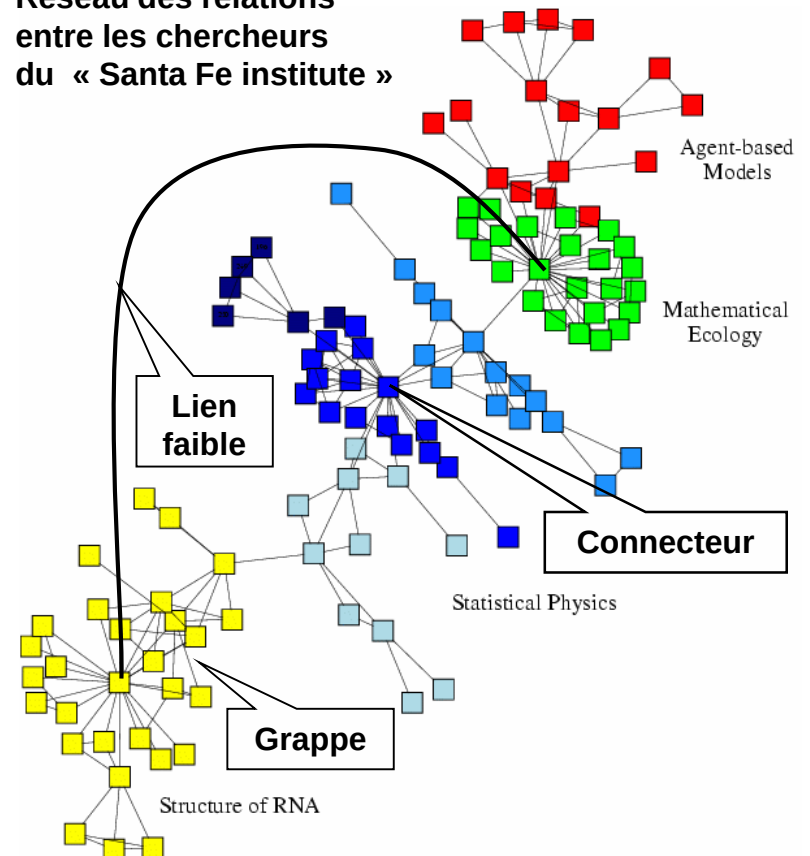
- **Outil puissant de simulation multi-agent dans de nombreuses applications : phénomènes physiques, biologiques, urbanisme, trafic routier...**
  - **Facilité de mise œuvre**
  - **Bien adapté aux situations où les liens d'interaction sont définis par des relations de proximité spatiale. Par exemple dans un eco-système les prédateurs attaquent les proies situées à proximité**
- **Comportements non prédictibles**
- **Progrès considérables de la théorie des automates cellulaires grâce à l'informatique**
- **6-4-1) Conclusion a/s simulation basée sur agents**
  - **C'est l'outil roi de l'étude des systèmes complexes**

## 6-5) Théorie des réseaux

- Un réseau est constitué de nœuds et de liens entre les nœuds
- Clique : groupe de nœuds totalement interconnectés
- Grappe : groupe de nœuds avec de nombreuses interconnexions
- Connecteur : nœud avec un très grand nombre de liens
- Lien faible : établit une relation entre deux grappes



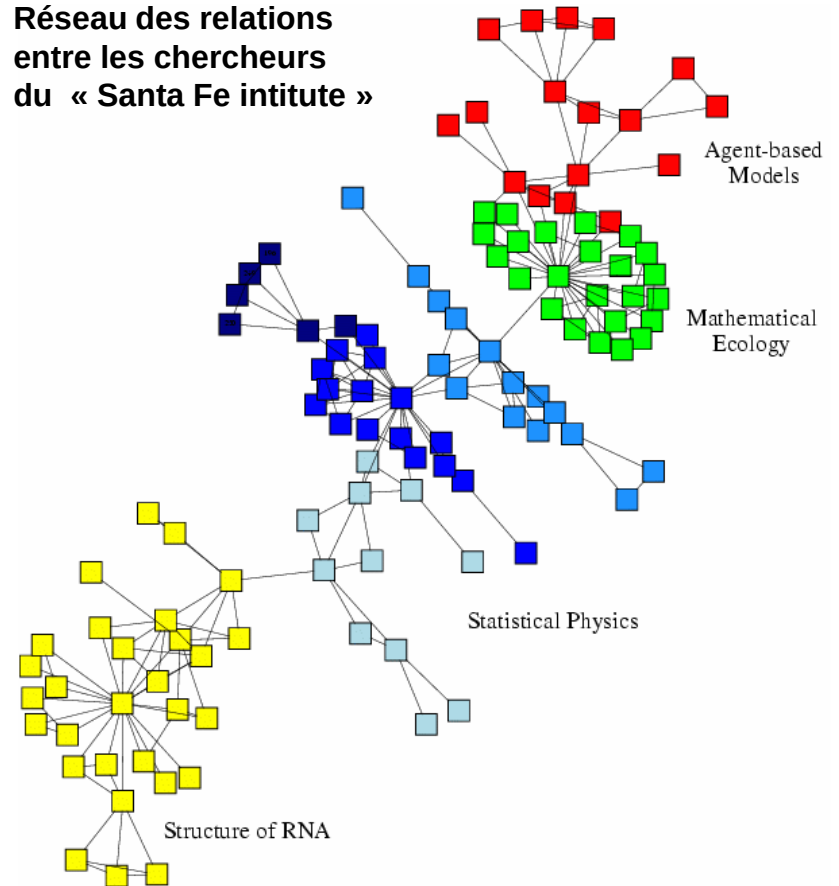
Réseau des relations entre les chercheurs du « Santa Fe institute »



## 6-5-1) Les caractéristiques des réseaux

- **Caractéristiques statiques**
  - Nombre de liens et de nœuds
  - Nombre moyen de liens par nœud
  - Loi de répartition du nombre liens par nœud
  - Distance entre deux nœuds : plus petit nombre de liens pour aller d'un nœud à l'autre
  - Loi de répartition des distances entre les nœuds
  - Distance moyenne entre les nœuds
  - Les caractéristiques des cliques et des grappes
  - Les caractéristiques des connecteurs
  - Le nombre des liens faibles
- **Caractéristiques dynamiques**
  - Règles d'attachement de nouveaux liens, de création et de disparition des agents
  - Vitesse de croissance

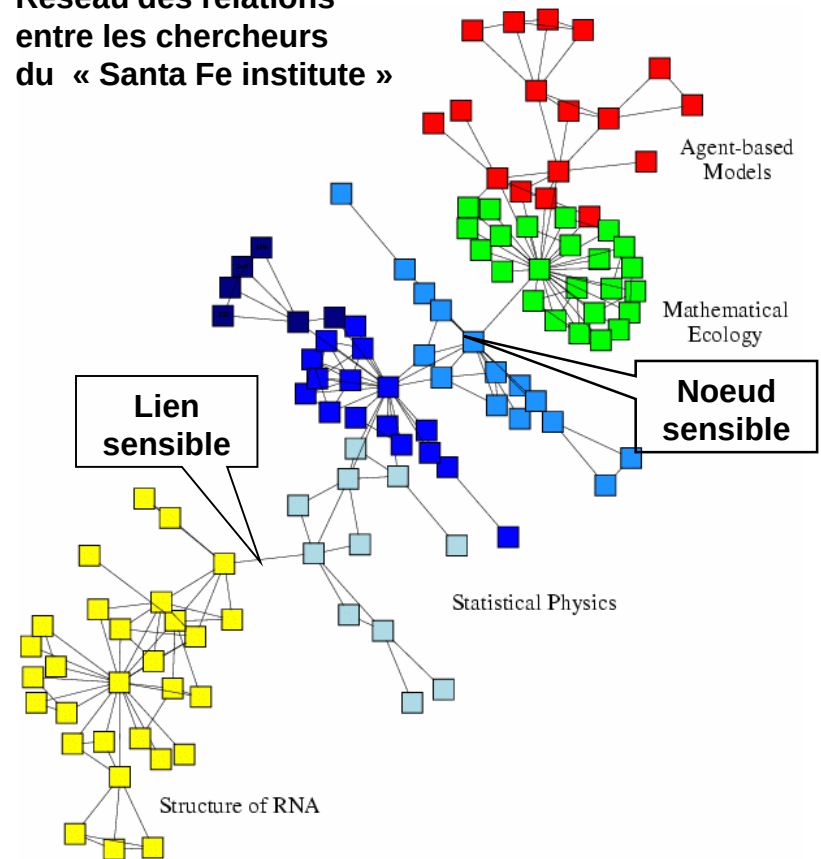
Réseau des relations entre les chercheurs du « Santa Fe Institute »



## 6-5-2) Les propriétés des réseaux

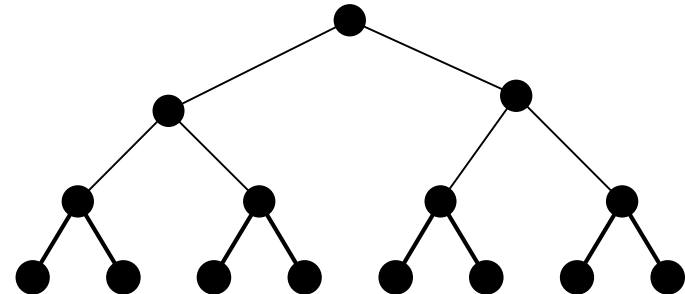
- **Sensibilité à des ruptures ciblées de liens**
  - La rupture d'un lien ne peut provoquer l'isolement d'un sous-ensemble du réseau
  - L'addition de liens permet d'accroître la résilience du réseau
- **Sensibilité à des ruptures ciblées de nœuds**
  - La suppression d'un nœud connecteur peut avoir un impact important sur les capacités de propagation
- **Sensibilité à des ruptures aléatoires de liens**
  - Accroissement de la longueur moyenne entre nœuds
- **Sensibilité à des suppressions aléatoires de nœuds**

Réseau des relations entre les chercheurs du « Santa Fe institute »

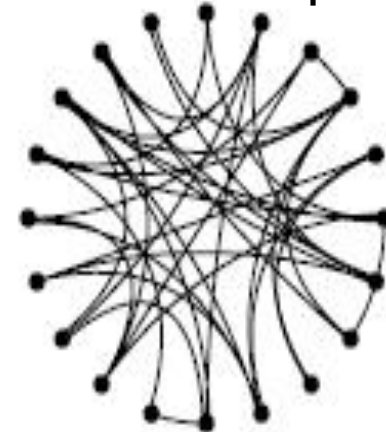


## 6-5-3) Les types de réseaux

- **Réseaux aristocratiques**
  - certains nœuds possèdent plus de liens que les autres
- **Réseaux égaux**
  - peu d'écart entre le nombre de liens des différents nœuds
- **Réseaux aléatoires**
  - Les liens sont affectés aléatoirement aux nœuds
  - Objet d'études théoriques mais rares dans la nature les systèmes sociaux et le WEB
- **Réseaux hiérarchiques**
  - égaux
  - longue distance moyenne entre les nœuds
  - présents dans les structures sociales hiérarchisées
  - sensible à des ruptures de liens ou des suppressions de nœuds



Réseau hiérarchique



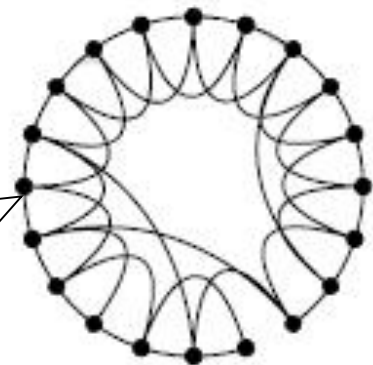
Réseau aléatoire de Strogatz

### 6-5-3) Les types de réseaux (suite)

- **Réseaux « Small World de Barabasi »**
  - aristocratiques
  - courte distance moyenne entre les nœuds
  - présent partout : biologie, écosystèmes, économie, sociologie, urbanisme, WEB...
  - résistant à des suppressions de liens et des ruptures de noeuds
- **Réseaux « small world » de Strogatz et Watts**
  - égalitaire
  - courte distance moyenne entre les nœuds
  - un faible % de liens raccourcit fortement la distance moyenne entre les noeuds



Réseau « small world » de Strogatz et Watts



## 6-5-4) Les réseaux « Small world »

- **« Six degree séparation » : Stanley Milgram**
  - Transmettre un message
  - 160 au hasard vers un Broker de Boston
  - $\frac{1}{2}$  à travers 3 connecteurs
  - Moins de 6 intermédiaires
- **Force de liens faibles (Granavotter) : recherche d'emplois**
  - 56% contacts personnels
  - dont 83% de liens faibles (occasionnels et rares)
- **Proximité > Similarité = Activités**

## 6-5-5) Contributions de la théorie des réseaux

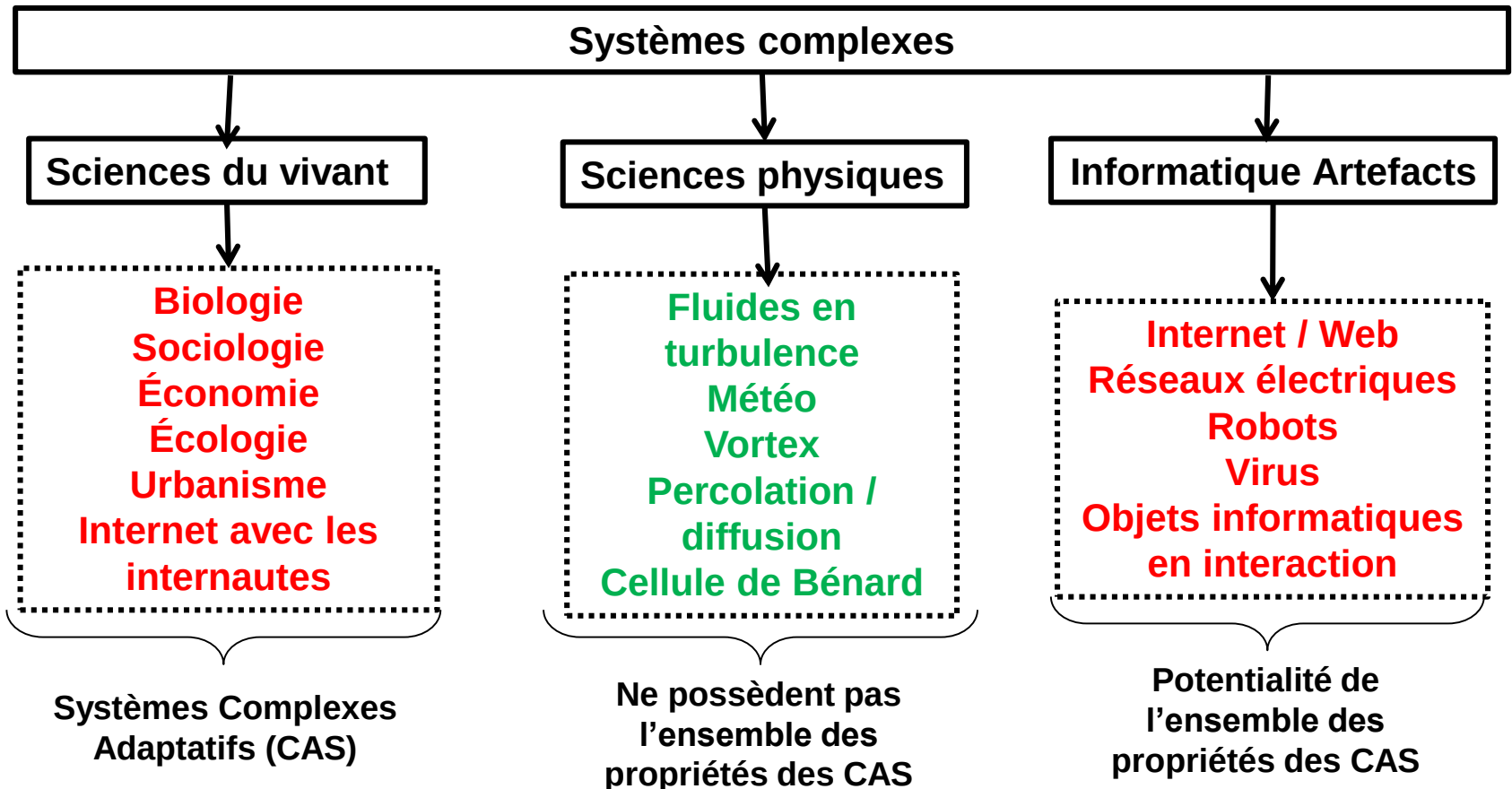
### Contribution de la théorie des réseaux à l'étude des systèmes complexes

- **Identifier les propriétés du système :**
  - Propagation des engouements, des maladies contagieuses
  - Résilience à des attaques ciblées d'agents
  - Résilience à des attaques aléatoires d'agents
- **Définir les interventions utiles pour atteindre un objectif :**
  - Faciliter la propagation d'engouements en développant les propriétés « small world » au moyen de liens
  - Freiner une contagion en inhibant des agents « connecteurs »
  - Réduire ainsi les capacités de propagations nuisibles en supprimant des liens pour fractionner un réseau en plusieurs réseaux
- **Mal adaptée à l'étude des comportements dynamiques**
  - Évolution de la configuration des systèmes : nombres de nœuds (agents)
  - Impact des règles de comportement des nœuds (agents)

## 6-5-5) Contribution de la théorie des réseaux

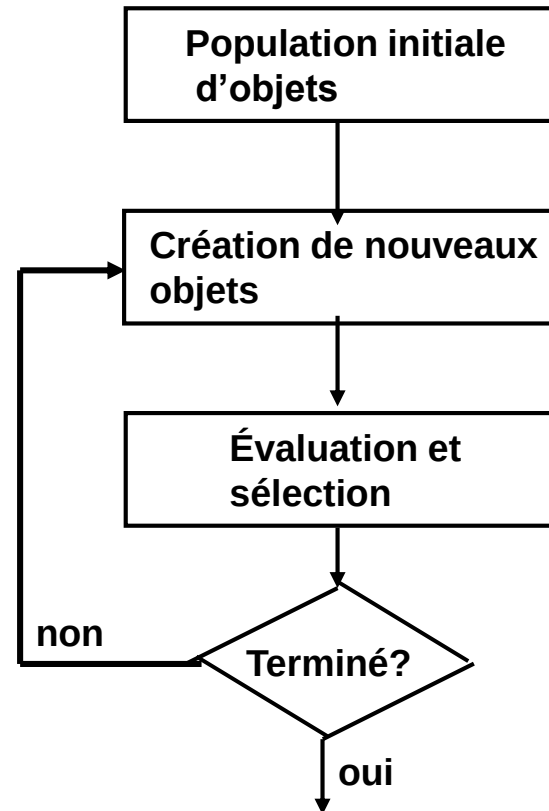
— Très importantes : études des propriétés des réseaux d'interactions

— Faibles à moyennes : identification des réseaux souvent impossibles



## 6-6) Itération création sélection

- Le processus itératif inspirés des processus d'évolution permet de faire évoluer des objet en vue d'atteindre des objectifs
- Chaque itération comprend deux étapes :
  - Créations de nouveaux objets à partir des objets sélectionnés
  - Évaluation et sélection vis-à-vis des objectifs visés
- Terminé ?
  - Résultat satisfaisant
  - Peu de progression
  - Temps imparti épuisé





## 6-6) Itération création sélection (suite)

- **Différentes méthodes :**
  - **Création d'objets**
    - Reproduction génétique
    - Intelligence collective
    - Méthodes classiques de création
  - **Sélection, évaluation :**
    - Intelligence collective
    - Simulation
    - Méthodes classiques d'évaluation

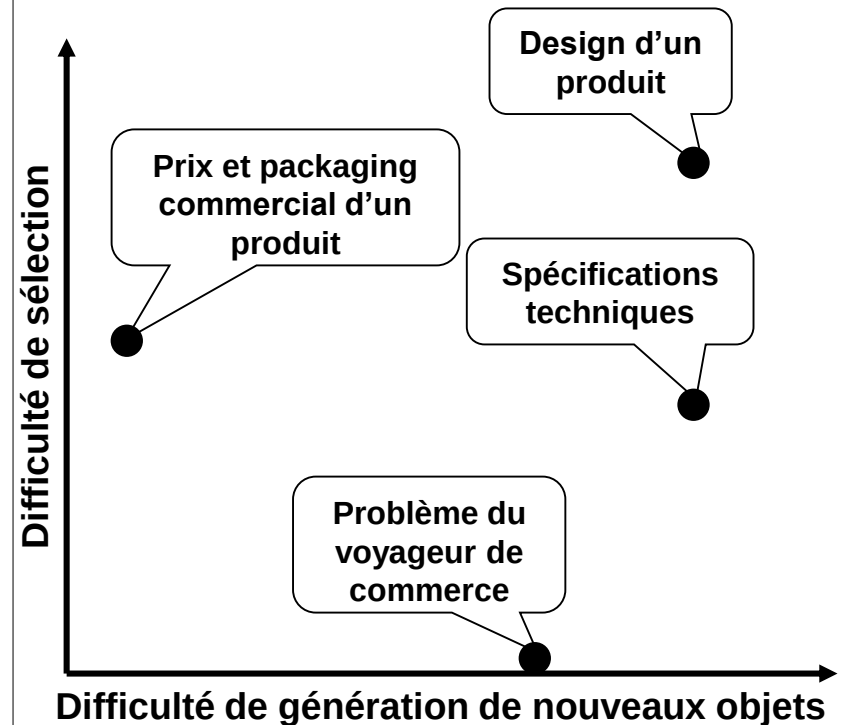


## **6-6-1) Contributions**

- **Les méthodes inspirées des théories de l'évolution permettent de :**
  - **Créer des objets innovants :**
    - **Spécifications techniques (bras de manutention d'un engin spatial de la NASA)**
    - **Styles, design de produits (design de voitures chez BMW)**
    - **Objets d'art, modes**
  - **Résoudre des problèmes :**
    - **Optimisation de trajets (problème du voyageur de commerce)**

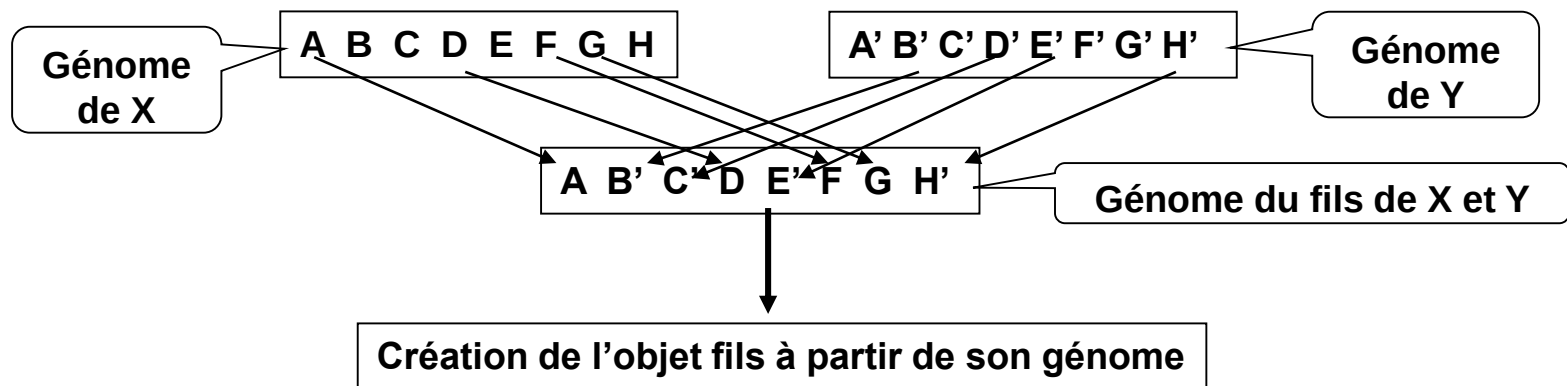
## 6-6-2) Classement par difficultés

- Les innovations basées sur la méthode itérative de création sélection peuvent classées en tenant compte des difficultés de :
  - création de nouveaux objets
  - évaluation et sélection
- Voyageur de commerce :
  - Objets créés : trajets
  - Sélection facile
- Design d'un produit
  - Difficulté de conception
  - Difficulté de sélection en vue d'un succès commercial
- Spécification techniques
  - création génétique utilisée par la NASA pour concevoir un objet de manutention



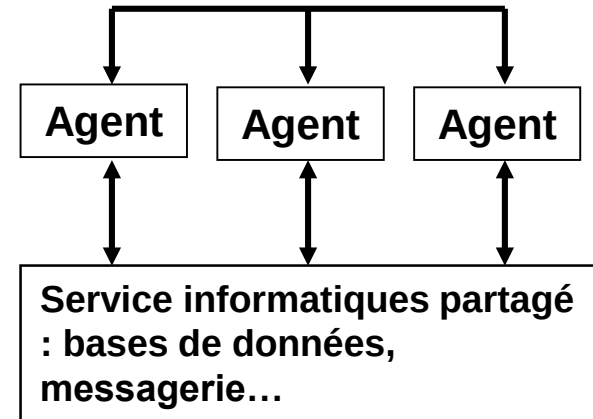
## 6-7) Création génétique

- **Applicable à des types d'objets variés : algorithmes, spécification, objets d'art...**
- **Création d'un nouvel objet à partir de deux objets :**
  - Associer à chaque objet des codes qui le caractérisent (génome)
  - Définir un processus de développement des objets à partir de leurs codes
  - Créer le code d'un nouvel objet à partir des codes de deux objets parents : croisements (coupure et concaténation) des séquences binaires des codes, éventuellement mutations



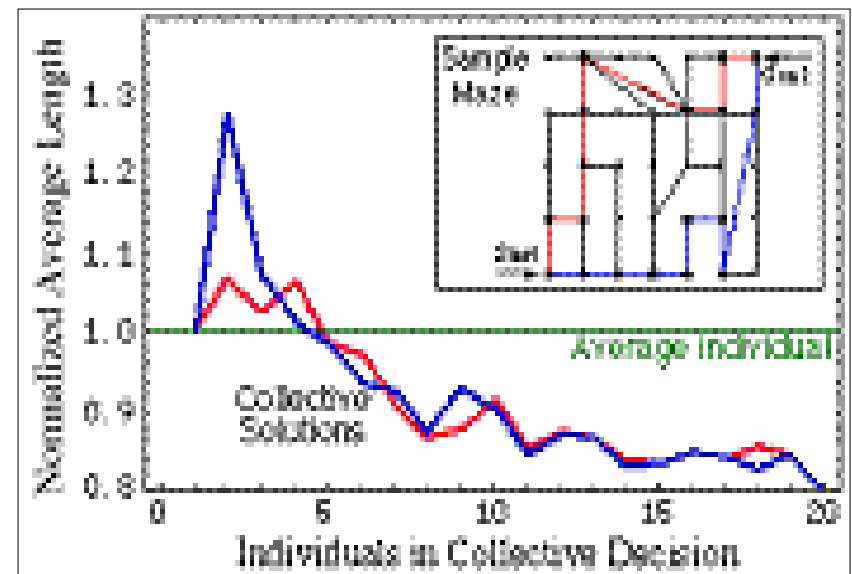
## 6-8) Intelligence collective

- **Intelligence d'une communauté de personnes en interaction :**
  - Une émergence
  - Peut se révéler supérieure à la somme des intelligences de chaque membre
  - Est amplifiée par :
    - La dynamique d'acteurs se rassemblant autour de finalités partagées
    - Une mutation culturelle : confiance dans la décentralisation
    - L'utilisation des NTIC : base de donnée partagée, messagerie, internet, intranet



## 6-8-1) Test du labyrinthe

- « n » personnes font un premier parcours d'un labyrinthe
- Elle font un deuxième parcours et obtiennent un temps moyen de parcours individuel «  $t_{mi}$  »
- Un temps collectif «  $t_c$  » obtenu en prenant à chaque bifurcation le chemin le plus fréquenté par les « n » personnes lors du premier parcours
- L'expérience montre que le trajet basé sur des décisions collectives est plus court, d'autant plus que « n » est grand



## 6-8-2) Cinq conditions (pratiques) de succès

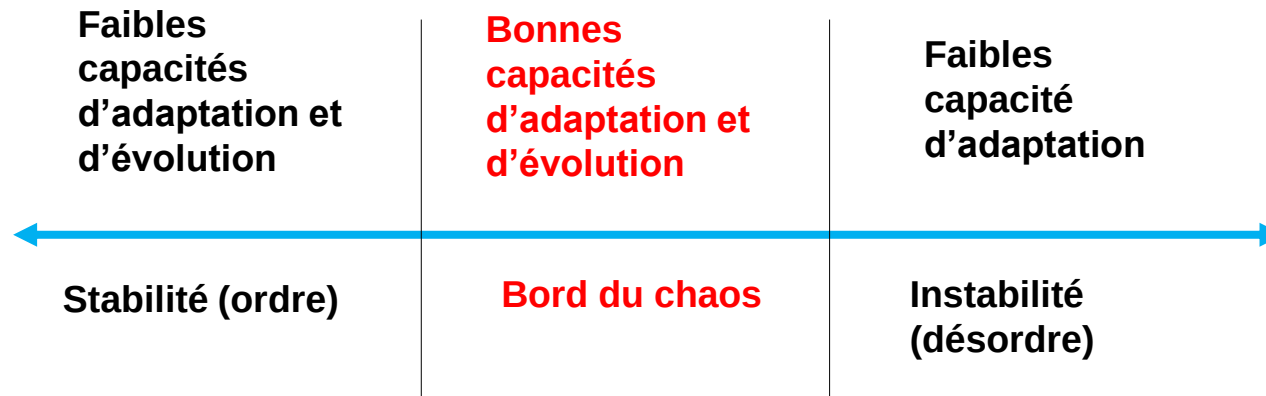
- **Assurer l'adéquation et la diversité des profils des membres**
  - Dans une communauté de « gros calibres » l'adjonction d'un « calibre moyen » favorise plus l'intelligence collective que celle d'un gros calibre
- **Assurer la contribution de membres**
  - Créer un système de récompenses
  - Éviter les conflits d'intérêt (ex: prévisions de responsables commerciaux)
  - Garantir la liberté d'expression
  - Éviter les déviations : mon intuition du jugement des autres (bulles spéculatives)
- **Offrir des services informatiques**
  - Bases de données partagées
  - Échanges d'information
- **Créer des feedbacks**
  - Offrir des moyens de mesure des écarts entre les contributions et les objectifs (exemple panel de consommateurs pour un produit)
- **Définir les règles de fonctionnement et les procédures**

### **6-8-3) Contributions de l'intelligence collective**

| <b>Type de contribution</b>               | <b>Exemples</b>                                                                                                                  |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Créations</b>                          | <b>Spécifications ou design d'un produit</b><br><b>Business plan</b><br><b>Campagne de marketing</b>                             |
| <b>Prévisions</b>                         | <b>Succès d'un produit</b><br><b>Volume des ventes</b>                                                                           |
| <b>Acquisition de connaissances</b>       | <b>Besoins et intérêts des client</b><br><b>Forces et faiblesses d'un produit</b><br><b>Opinion des clients (Amazon, Google)</b> |
| <b>Décision/sélection</b>                 | <b>Choix d'un produit</b><br><b>Orientation stratégique</b><br><b>Campagne de promotion</b>                                      |
| <b>Auto organisation d'une communauté</b> | <b>Auto segmentation</b>                                                                                                         |

## 6-9) 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.



## **6-9-1) Contribution à l'étude des systèmes complexes**

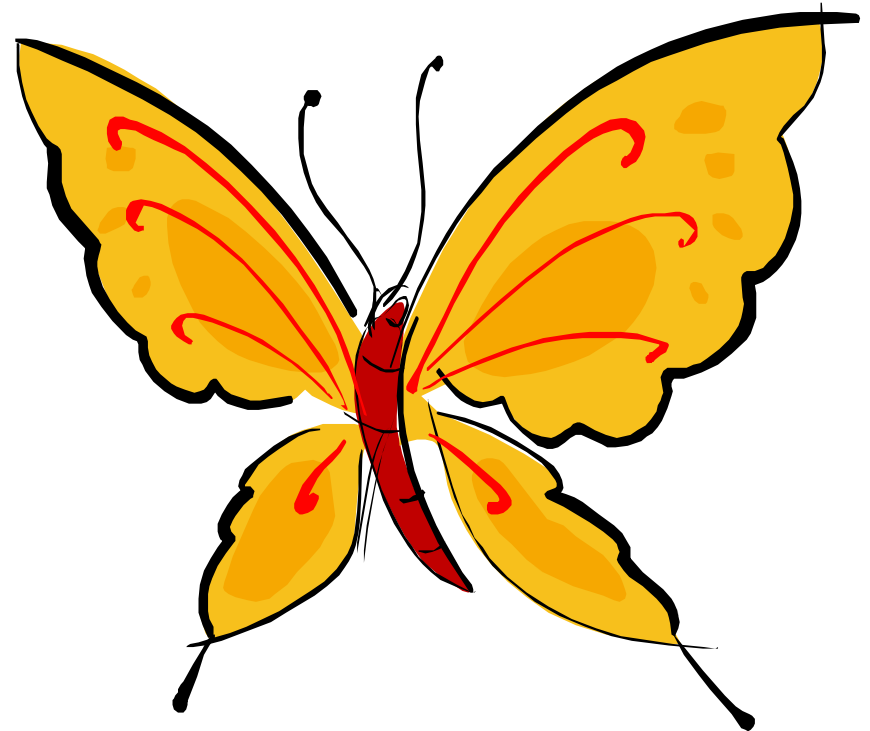
- **Expliquer le comportement d'un système par son positionnement sur l'axe stabilité / instabilité**
- **Définir des intervention dans un système pour modifier son comportement :**
  - **Renforcer la créativité en le positionnant au bord du chaos (entre stabilité et instabilité)**
  - **Assurer sa stabilité**
  - **Développer le désordre**
- **Méthodes pour déplacer le positionnement d'un système sur l'axe stabilité / instabilité. Déplacement vers l'instabilité :**
  - **accroître le nombre et la diversité des liens d'influences sur les agents**
  - **inhiber une influence dominante**
  - **accroître la diversité des agents**
  - **assouplir les procédures**
- **Dans certaines situation il est recommandé de laisser faire le tropisme naturel des système vers le bord du chaos, donc vers la créativité.**

## **6-9-2) La communauté de développement de linux**

- **Équilibre apparent entre facteurs d'ordre et désordre :**
  - **Ordre : forte adhésion des agents contributeurs aux objectifs (produit linux compétitif)**
  - **Désordre : forte personnalité des contributeurs**
- **En 10 ans, aucune manifestation de désordre**
- **Communauté pas figée ; adaptation de l'organisation à :**
  - **Forte croissance des effectifs**
  - **Évolutions du projet**
  - **Évolutions de l'environnement (Technologie, usages...)**

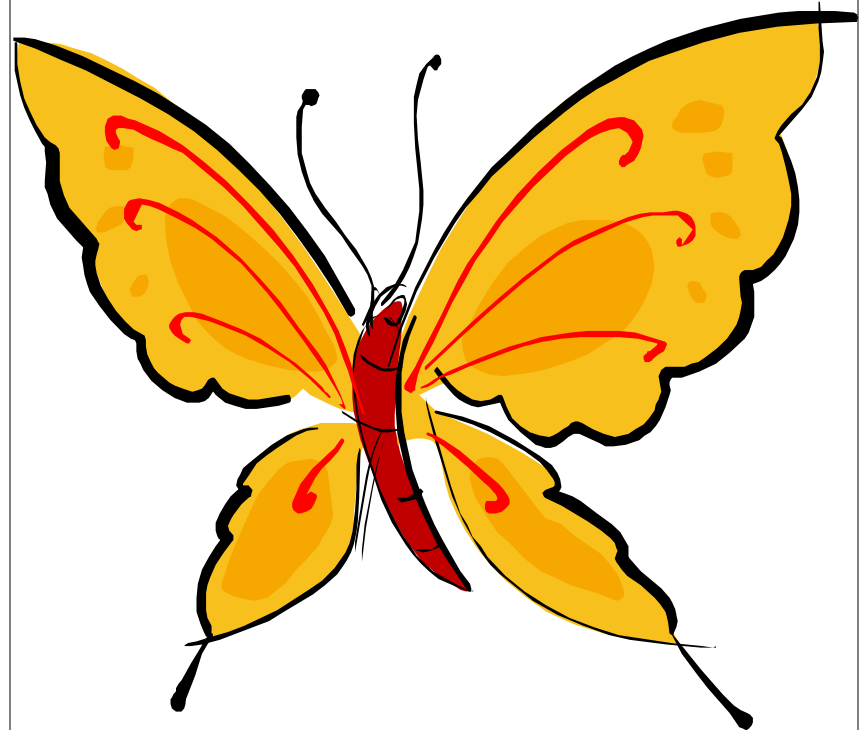
## 6-10) Théorie du chaos

- Un système relève de la théorie du chaos si son comportement dynamique est très sensible aux conditions initiales (effet papillon)
- Ces systèmes sont non linéaires : au moins une relation entre une cause et son effet n'est pas linéaire:
  - Cause : stimuli reçus par les agents
  - Effet : impact des stimuli sur le comportement des agents
- Tous les systèmes complexes, particulièrement les systèmes complexes adaptatifs, relèvent de la théorie du chaos.



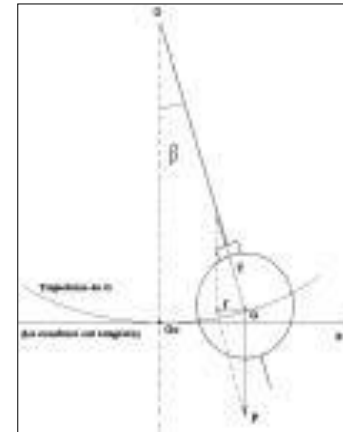
## 6-10) Théorie du chaos (suite)

- **Les systèmes relevant de la théorie du chaos sont :**
  - **Déterministes pour les mathématiciens**
  - **Pratiquement non déterministes pour les physiciens**
- **Outils mathématiques impuissants dans l'étude des systèmes d'équations non linéaires**
- **Progrès considérables grâce à l'informatique**



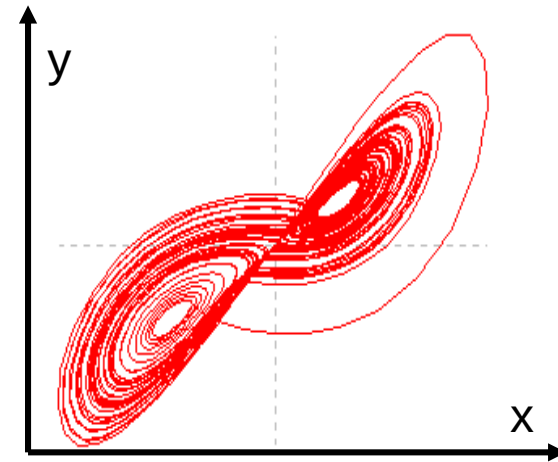
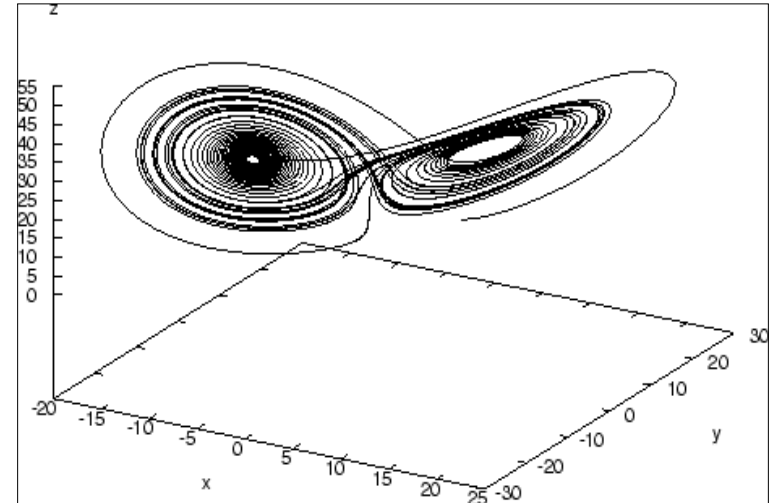
## 6-10-1) Attracteur

- Un attracteur (ou bassin d'attraction) est un domaine de convergence des évolutions d'un système. Exemples :
  - Bille dans un bol : attracteur réduit à un point
  - Cours d'eaux dans une vallée : le fond de la vallée
  - Pendule sans frottement : arc de cercle
- Un système complexe peut avoir plusieurs attracteurs
- Bifurcation : point de la trajectoire d'un système où une petite cause peut avoir un impact important sur son évolution, par exemple vers un attracteur



## 6-10-1) Attracteur (suite)

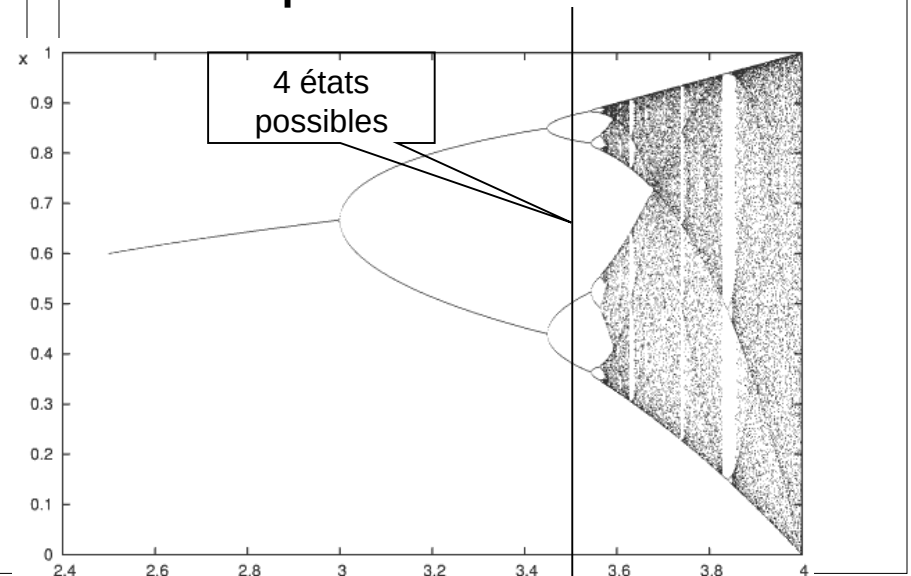
- Un attracteur peut être défini au moyen de quelques variables d'un système choisies en fonction de leur pertinence pour le phénomène étudié.
- Exemple :
  - Un système possède trois variables  $x(t)$ ,  $y(t)$  et  $z(t)$
  - Une étude d'attracteurs peut être réalisée avec les variables  $x$  et  $y$  dans un espace à 2 dimensions



## 6-10-2) Variables discrètes

- Les variables des systèmes de la théorie du chaos peuvent être :
  - Continues. Cas ci-dessus des équations de Lorentz
  - Discrètes. : Cas de la suite de Fageinbaum
- Suite de Fageinbaum (Courbe logistique)
  - $a < 3$  attracteur point fixe
  - $3 < a < 3,57$  attracteur périodique. Période =  $2^p$ . « p » entier croissant avec a.
  - $3,57 \leq a < 4$  attracteur fractal
  - Lorsque « a » croît on obtient une évolution de la suite  $X_n$  de la régularité vers le chaos

- Suite de Fageinbaum
  - $X_{n+1} = a X_n(X_n + 1)$
  - X variable dynamique
  - n temps discret
  - a paramètre
  - Ex. évolution d'une population d'une espèce

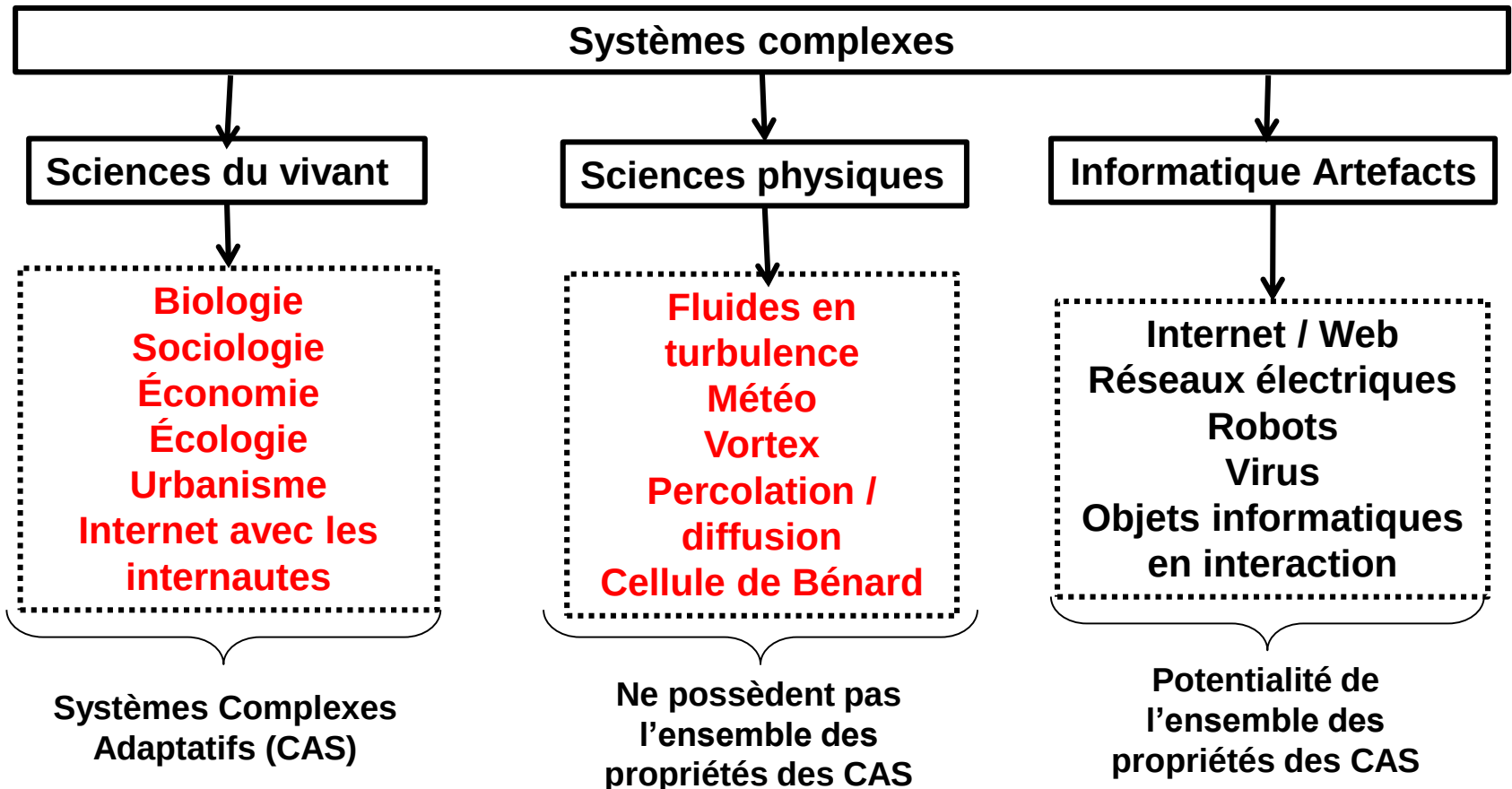


## **6-10-3) Contributions de la théorie du chaos**

- **Systèmes qu'il est possible de mettre en équation**
  - **Cas de :**
    - **Certains systèmes des sciences physiques**
    - **Modélisation très simplifiée des systèmes complexes adaptatifs**
  - **L'analyse des équations permet d'étudier :**
    - **Les bassins d'attraction**
    - **Les conditions de basculement, saut d'un bassin d'attraction vers un autre**
    - **La sensibilité aux conditions initiales**
- **Systèmes qu'il n'est pas possible de mettre en équation :**
  - **Théorie du chaos explique :**
    - **L'existence de plusieurs bassins d'attraction (états de pseudo équilibre)**
    - **Les instabilités**
    - **L'extrême sensibilité aux conditions initiales**

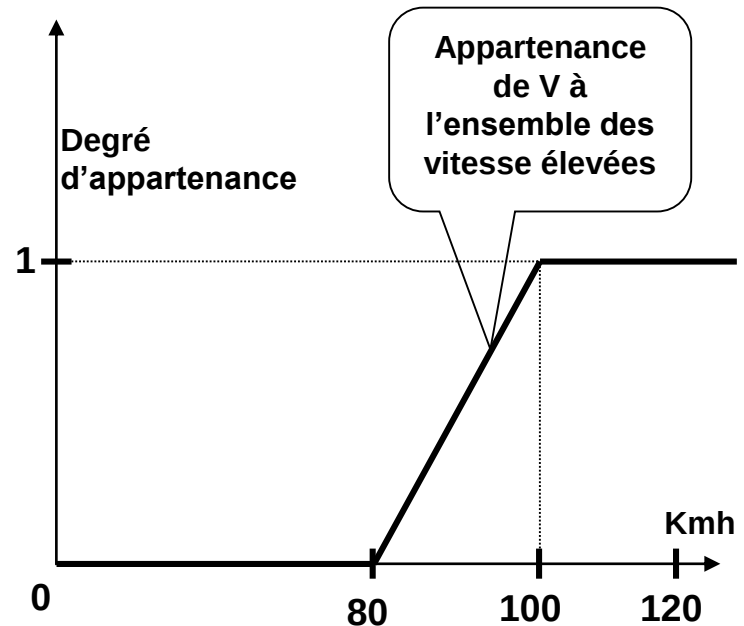
## 6-10-3) Contribution de la théorie du chaos (suite)

— Très importantes : tous les systèmes complexes relèvent de la théorie du chaos



## 6-11) La logique des variables floues (fuzzy logic)

- Une variable « X » est floue si son appartenance à un ensemble « A » peut être partielle
- Exemple : Vitesse V
  - $V \geq 100$  Kmh appartenance totale à l'ensemble VE des vitesse élevées
  - $V \leq 80$  Kmh appartenance partielle à l'ensemble VE
  - $V < 80$  Kmh aucune appartenance à VE
- Valeurs de X comprise entre « 0 » et « 1 »
  - $X = 0$  : aucune appartenance à A
  - $0 < X < 1$  : appartenance partielle à A
  - $X = 1$  : appartenance totale à A
- La caractéristique de flou d'une variable est liée à une référence à un ensemble :
  - V exprimé en Kmh n'est pas flou
  - V qualifié de « élevé » est flou



## **6-11) Logique des variables floues (suite)**

- **Les variables floues sont présentes partout :**
  - **Elles représentent l'expression des variables dans le langage de tous les jours**
  - **Elles permettent de communiquer et de traiter des appréciations personnelles**
  - **Elles permettent de traiter des informations imprécises et incomplètes**
- **La logique des variables floues possède ses propres règles**
  - **Par exemple l'intersection de deux variables floues est égale à la plus petite de ces deux variables**
- **Les applications de logique des variables floues sont très nombreuses :**
  - **Systèmes de contrôle des ascenseurs, des machines à laver, des automatismes de sécurité des automobiles...**
  - **Les systèmes de contrôle à logique floue sont réalisés avec des microprocesseurs classiques.**

## **6-11) Logique des variables floues (suite)**

- **Contributions de la logique du flou à l'étude des systèmes complexes :**
  - **Définition des règles de comportement des agents plus proches du réel que celles obtenues avec les outils classiques.**
    - **Les agents du monde vivant perçoivent les stimuli reçus comme des variables floues : il fait plus ou moins chaud, une menace est plus ou moins grande...**
  - **Enrichissement des méthodes de simulation à partir des agents**

## **6-13) Mémétique**

- **Mémétique : étude de l'évolution des idées et des cultures en appliquant les lois de l'évolution darwinienne**
- **Mème : idée, comportement, élément culturel**
  - **Les mèmes se transmettent de personne à personne, évoluent, se renforcent ou disparaissent.**
  - **Le mème est à la culture, aux idées ce que le gène est à la biologie**
  - **Exemples de mèmes :**
    - **images associées à des épisodes de l'histoire**
    - **musique que l'on ne peut chasser de son esprit**
    - **proverbes, dictons, aphorismes**
    - **modes, engouement**
    - **identité d'un groupe : ensemble de mèmes (méméplex) partagés**
- **Une culture peut être assimilée à un ensemble de mèmes**

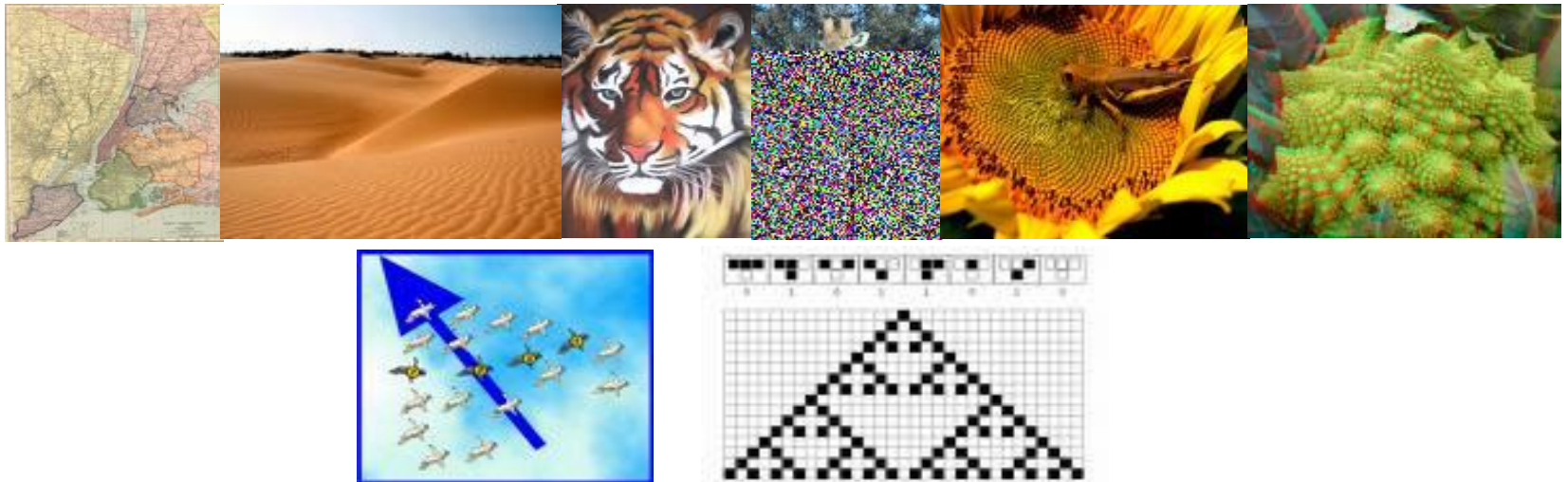
## **6-13) Mémétique (suite)**

- **Contributions de la mémétique à l'étude des systèmes complexes :**
  - **Modélisation informatique des systèmes sociaux ( en émergence)**
  - **Étude de la propagation des idées, des messages de propagande**
  - **Applications marketing : génétique des marques, publicité**
- **Science en émergence qui semble intéresser plus les entreprise que les scientifiques**

## **6-14) Systèmes neuronaux**

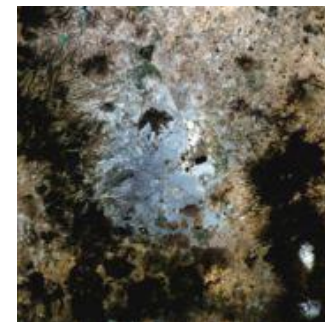
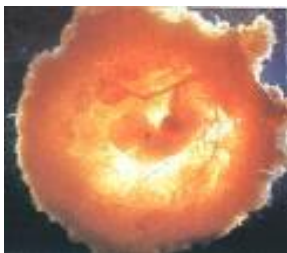
## 6-15) Morphogénèse

- **Ensemble des mécanismes générant l'apparition reproductible de structures et contrôlant leurs formes. Exemples :**
  - Processus de développement des formes d'un organisme et des organes durant l'embryogénèse (+ tératologie)
  - Processus de formation du relief de l'écorce terrestre
  - Processus de création d'un ensemble de formes urbaines (morphogénèse urbaine)



## 6-15) Morphogénèse

- **Les précurseurs**
  - **D'Arcy Wentworth Thompson (1917 : On Growth and Forms)**
  - **Alan Turing (1952: The Chemical Basis of Morphogenesis),**
  - **René Thom (fin 60 : Stabilité Structurale et Morphogénèse)**



## 6-15-1) Exemples de formation de motifs

| Domaine                   | Exemples                                                                 | Forces                                                                                                                                                                                                                                                                       | Règles                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tâches des animaux</b> | Bandes (Tigre et zèbre),<br>Bulles (léopard, hyènes),<br>Mousse (girafe) | <b>Structure de Turing :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>mélanine</b> (pigment foncé) produite par certaines cellules</li> <li>• diffusion par mouvement brownien d'activateur et d'inhibiteur à <b>vitesse de diffusion différentes</b> → motifs</li> </ul> | Selon équations de réaction-diffusion de Turing <ul style="list-style-type: none"> <li>• le motif obtenu est <b>f(forme &amp; taille de la surface)</b></li> <li>• pas de motifs pour les embryons de souris (trop petit), et de l'éléphant (trop gros)</li> <li>• si une surface - assez grande pour des tâches - devient un cylindre : taches → rayures (ex. queue du guépard) mais pas l'inverse : pelage rayé ne donne pas de queue tacheté)</li> </ul> |
| <b>Formes des plantes</b> | Pomme de pin, tournesol, ananas                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                              | Suite de <b>Fibonacci</b> : <ul style="list-style-type: none"> <li>• voir ci-après « Création d'objets complexes »</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

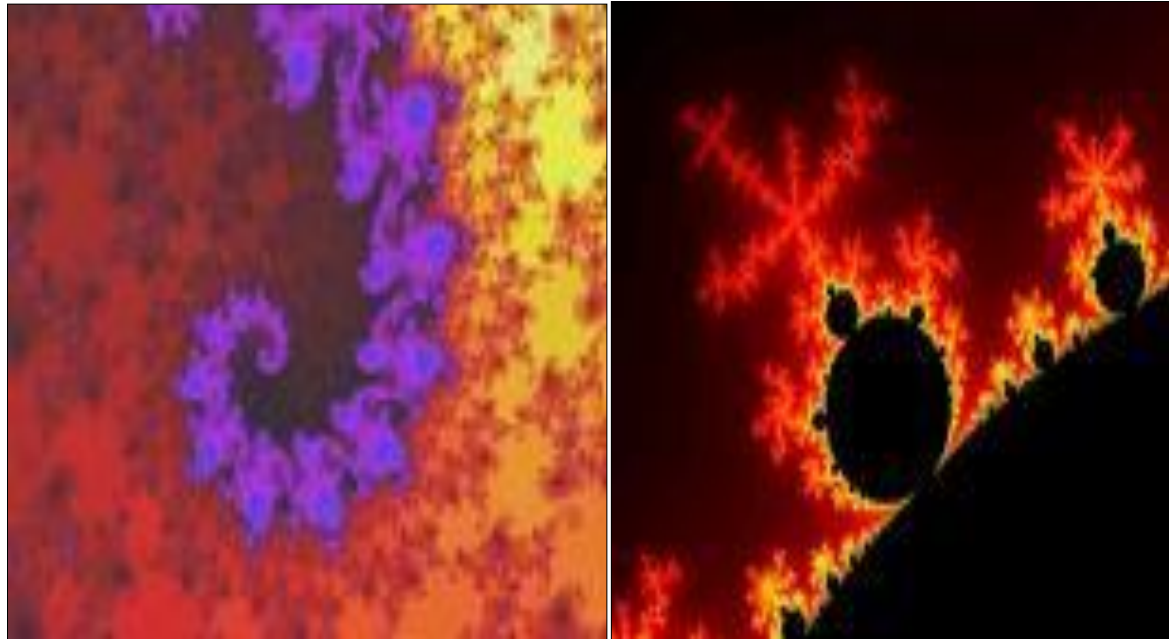
## 6-15-2) Exemples de formation de motifs (suite)

| Domaine        | Exemples                                                                                                                                      | Forces                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Règles                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Dunes</b>   | Grandes à petites dunes proche du mini. Pas de très petites<br>Transverses (demi-lune),<br>Longitudinales (L>I), Parkhane (croissant allongé) | <b>Le vent modifie la dune qui modifie le vent :</b><br><br><u>force du vent</u> *<br><u>frottement du vent</u><br><u>sur le sable</u> *<br><u>gravitation</u> .                                                                                                                                                                                                                    | Le vent fait avancer la dune :<br>• Vitesse = $k \times 1/\text{hauteur}$<br>• <b>Dune = organisme vivant</b><br>• gains et pertes permanents<br>• auto-organisation stable<br>• dépendance vis-à-vis de l'extérieur<br>• génération de nouveaux individus après rencontre |
| <b>Général</b> | Pelage, plantes, films magnétiques...                                                                                                         | <b>Les morphologies sont obtenues à l'équilibre (énergie minimum)</b><br><b>Trois interactions fabriquent les motifs</b><br>• 1 répulsive à très courte portée et 1 attractive à moyenne portée<br>• 1 autre répulsive à longue portée donne la régularité<br><b>Nombre de Bond</b><br>• <b>Nb de Bond</b> = Énergie répulsive / énergie attractive > 1<br>→ organisation en motifs |                                                                                                                                                                                                                                                                            |

### 6-15-3) Création d'objets complexes

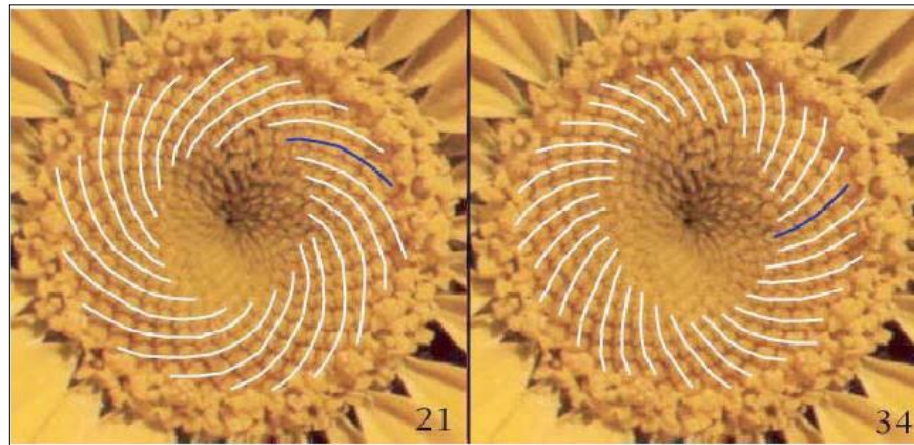
**Des objets d'une grande complexité peuvent être créés à partir de règles extrêmement simples :**

- **Mandelbrot set :  $Z_{(\text{next})} = Z^2 + C$  (Z nombre complexe)**



## 6-15-3) Création d'objets complexes (suite)

- Suite de Fibonacci
  - $N_{(enxt)} = N_p + N_{p-1}$  : 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144...
  - elle est assez fréquente dans les règnes Végétal et Animal;
    - La pomme de pin a 21 spirales dans un sens et 34 dans l'autre. Ces deux nombres sont 2 voisins de la suite de Fibonacci
    - Et dans l'ananas et le tournesol
  - la suite de Fibonacci ne se trouve pratiquement pas dans le règne Minéral et chaque fois qu'on la rencontre dans le monde du vivant, il se trouve des espèces plus ou moins proches qui ne s'y conforment pas.



## 6-15-4) Contribution à l'étude des systèmes complexes

Règles permettant de :

- 1) Comprendre pourquoi certaines **formes et patterns** sont plus probables
- 2) Etudier les **forces génératrices** d'émergence
- 3) Affirmer que **la sélection naturelle** ne s'applique pas à des formes produites par pur hasard mais uniquement aux formes probables
- 4) Comprendre pourquoi des organismes, plus complexes que **la taille mémoire du génome** ne le permettrait, peuvent être produits
- 5) Mettre en évidence **l'universalité des patterns et des règles**, c'est-à-dire l'indépendance du substrat et du domaine :
  - Les règles vont être les mêmes
    - pour un fluide chauffé, un réseau d'agents logiciels, une termitières ou un groupe humain...
    - Pour la vie à base de carbone, d'autres matériaux, l'informatique sur silicone
  - Il semble que la matière et la forme aient chacune leurs lois