

Complétée après la réunion du 6 avril

# Enrichir un sujet au moyen des sciences de la complexité



Par Michel Bloch et Georges Lopicard

*Avec des conseils  
de Bertrand de la Chapelle et Alexandre Makarovitsch*

**« A la vue de patterns et de structures, nous faisons instinctivement l'hypothèse qu'il y a des causes et un contrôle centralisés... nous imaginons qu'il y a un responsable. »** Michel Resnick - *Tortues, Termites et Embouteillages.*



Trois questions pour enrichir un sujet  
avec les sciences de la complexité :

- I. Que veut-on faire ?
- II. Quel est le comportement du système ?
- III. Quels outils parmi les diverses disciplines ?
- IV. Résumé et conclusions

**+ exemples tirés d'une étude  
sur la communauté Linux**

*Inspirés librement de  
« Linux : Un Bazar au bord du chaos »  
Décembre 1999 Ko Kuwabra – Cornell U*

# I. Que veut-on faire ?



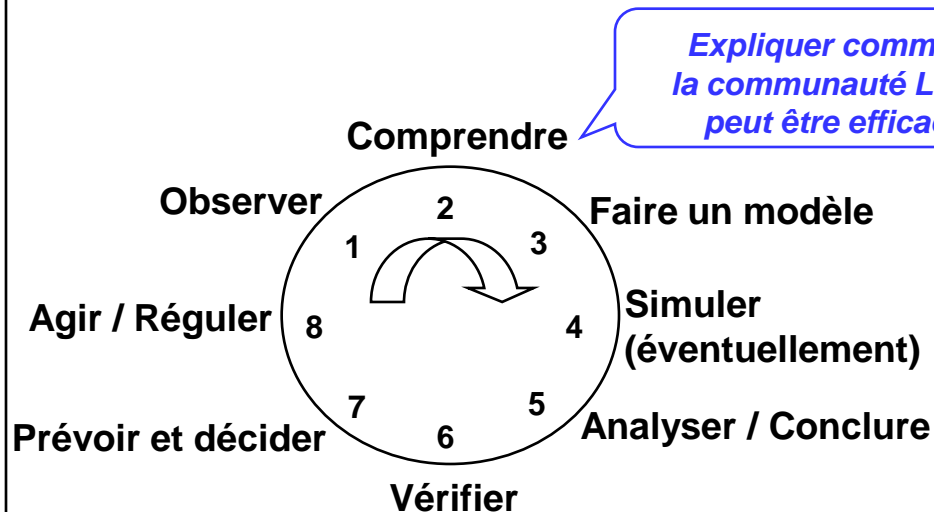
## 1) Sujet traité

« *Le développement de linux par une communauté de contributeurs (environ 40.000 depuis 1995)*

*Non rémunérés*

*Sans organisation classique des développements logiciel »*

## 2) Objectifs



## Sujets du groupe Emergence Paris

Valeur globale co-créeée avec le clients

L'Internet, Google, EBay, Amazon

Gouvernance

Intelligence collective

Le management asiatique

Le cerveau

Créativité

Humanisme et sciences de la complexité

Marketing

Ensorcellement

Désordre climatique

Et... Evolution de la vie,

## II. Quel est le comportement du système ?

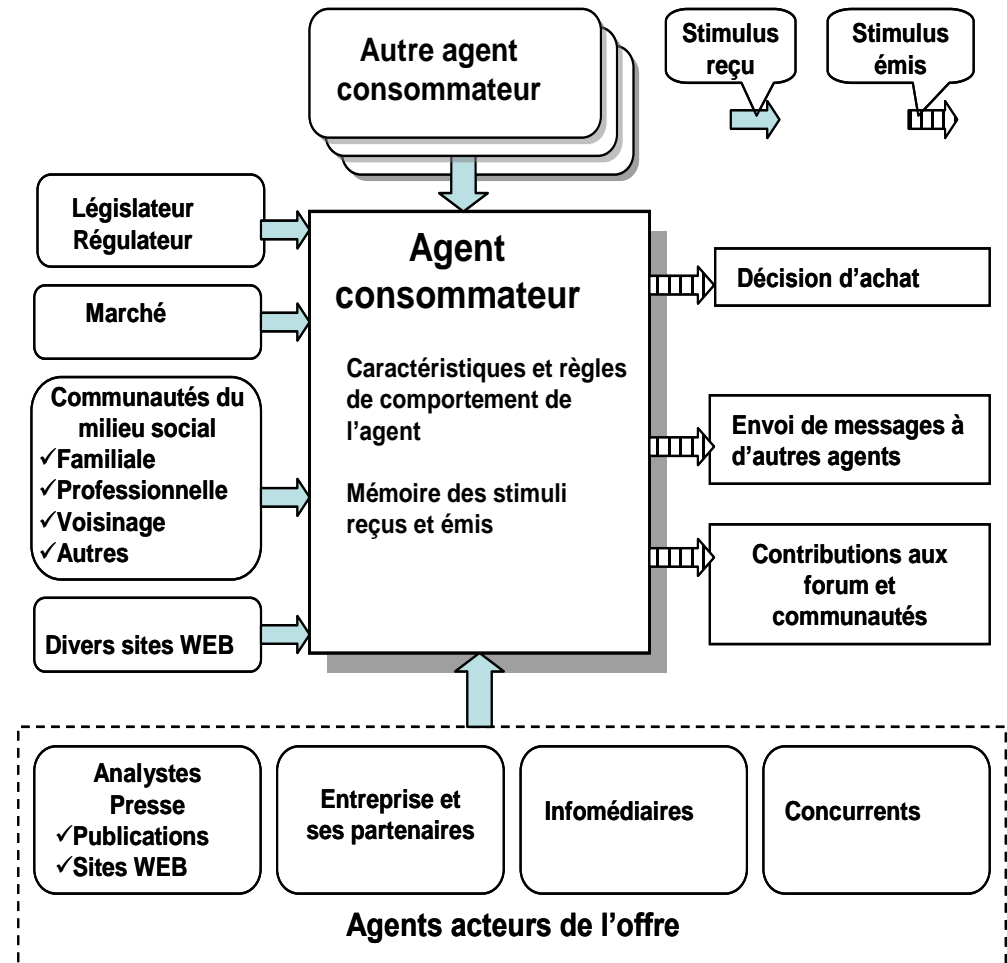
	Exemple Linux
<b>1) Délimiter le système</b> Définir le système et les sous-systèmes Définir l'environnement <b>Analyser l'interface</b>	<b>Système : Ensemble des Contributeurs et sous-groupes</b> <b>Environnement : {systèmes d'information}</b> <b>Messagerie ; fichiers partagés ; outils de développement...</b>
<b>2) Décrire les comportements, les émergences</b>	
<b>Description des émergences</b> Niveau d'apparition de la propriété émergente Evolution / dynamique du système Loi de distribution des caractéristiques Propriété fractales (homothétie interne)	<b>Au niveau de la communauté :</b> <b>versions Linux (qualité, perf., rapidité dev.)</b> <b>auto organisation des contributeurs</b>  <b>Pas étudié</b>
<b>Impacts sur le système de perturbations provoquées, Exemples</b> Vitesse de propagation d'une rumeur dans une communauté Réaction d'une communauté à une rumeur Impact sur un écosystème d'un phénomène climatique	<b>Impact limité en nb de membres concernés mais potentiellement durable</b>
<b>Lois de distribution des comportements du système</b> Nb d'agents impactés par une intervention Durées de vie d'un agent ou d'un type d'agent	<b>Pas étudié</b>

## II. Quel est le comportement du système ? (suite)

	Exemple Linux
<b>3) Décrire les agents</b> Types d'agent, nombre d'agents par type Environnement en interaction avec agents	<b>Contributeurs avec des rôles essentiellement auto définis : développement, maintenance, intégration, qualification</b>
Stimuli reçus par les agents	<b>Mails, informations consultées dans les bases de données partagées</b>
Stimuli émis par les agents	<b>Mails, mise à jour des bases de données</b>
<b>4) Définir les règles de comportement des agents</b> Règles de comportement en fonction des stimuli reçus et du vécu des agents (information mémorisées) Exemples : Imitation : Si n% de mes amis achètent un produit, je l'achète Intérêt personnel : je choisis le produit qui a l'utilité la plus grande pour moi	<b>Volontariat : Contributions fonction des compétences, goût , impact de la contribution, performance, qualité</b> <b>Charte et contrat des logiciels libres</b> <b>« Simple is beautiful »</b> <b>Motivations des contributeurs</b> Aucune rémunération Plaisir du travail en équipe, Réputation au sein de la communauté Équité vis-à-vis des autres contributeurs Satisfaction d'apporter une pierre à l'édifice linux

## II. Quel est le comportement du système ? (suite)

### Exemple d'un consommateur *(Etude Marketing et complexité de MB et GL)*






## II. Comportement du système ? (suite)



	Exemple Linux
5) Est-ce un système complexe ?	Oui pour la communauté des contributeurs
<u>Conçu</u> par 1 concepteur de haut en bas ou <u>Généré</u> de bas en haut, sans concepteur ? Y-a-t-il des acteurs <u>indépendants</u> qui interagissent ? Quelles voies de <u>communication</u> ?	<b>Système social constitué spontanément par les contributeurs</b> <b>Oui : les contributeurs</b> 1 to 1 et 1 to many via les mails 1 to many via les bases de données partagées Stigmergie : à travers les versions et le code
Quelles sont les <u>boucles de rétroaction</u> et les stimuli émis/reçus ? <u>Positives</u> (mécanismes qui amplifient les petites variations) <u>Négatives</u> réduisant les déviations dues aux mécanismes précédents	<b>Positives :</b> Appréciations par les autres contributeurs, Constatation de la qualité des développements <b>Négatives :</b> charge de travail, difficultés, opinions négatives
Assiste-t-on à des distributions en loi de puissance ? Y-a-t-il une notion d'invariance d'échelle (fractales) ?	Non Etudié  Oui : sous-groupes, groupes, Communauté...

## II. Comportement du système ? (suite)

	Exemple Linux
<b>6) Peut-on raisonner par analogie avec d'autres systèmes complexes déjà étudiés ?</b>	
<p>Propagation de messages ou de virus Evolution biologique ou culturelle Systèmes immunitaire, nerveux... Ruche, fourmilière... Système climatique... Evolution d'une civilisation Evolution d'une agglomération Internet et Web Intelligence collective (renforcé par Internet)</p> 	<p><b>Évolution non darwinienne</b> parce que :</p> <p><b>Les agents connaissent l'impact de leurs décisions sur le produit linux</b></p> <p><b>Pas de sélection/reproduction de plusieurs développements simultanés de Linux</b></p> <p><b>Oui</b></p>
<b>7) Peut-on anticiper / supposer / constater l'existence de patterns ?</b>	
<p>Attracteurs fixes, cycliques, étranges Structurations de réseaux, percolations... autres...</p>	<p><b>Non étudié</b></p>



# Récapitulatif et Discussion



1. Que veut-on faire ?

2. Quel est le comportement du système ?



**a. Intelligence collective**

**b. Théorie de l'évolution**

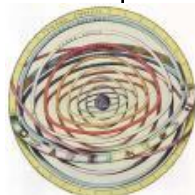
3. Quels outils parmi les diverses disciplines ?

**c. Hypothèse « Bord du chaos »**

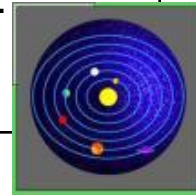
**d. Logique graphes et réseaux**

**e. Simulation multi-agents**

**f. Théorie du chaos**



4. Sujet enrichi :  
Exemple communauté Linux



## III. Quels outils parmi les disciplines ?

### (3) Quels outils et quelles disciplines ?

Discipline	Objectifs	Cas d'utilisation
<b>a. 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>• <i>Travail de groupe</i></li> <li>• <i>Exemples : Communauté Linux, Prévisions</i></li> </ul>
<b>b. Théorie de l'évolution</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Créer, innover</li> <li>• Etudier l'évolution d'un écosystème</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systèmes vivants, culturels ou sociaux s'auto-organisent face aux variations de l'environnement</li> <li>• <i>Exemple : Communauté Linux</i></li> </ul>
<b>c. 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 Logique, graphes et réseaux</li> <li>• <i>Exemple : Systèmes sociaux, économiques</i></li> </ul>

## 3.a. Intelligence collective

	Exemple Linux
<p><b>Intelligence d'un groupe en interaction supérieure à l'ensemble des membres</b></p> <p><b>Cas d'utilisation :</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>Création d'objets physiques ou abstraits</li><li>Acquisition de connaissance sur un sujet</li><li>Prévision, aide à décision</li></ul> <p><b>Facteurs de succès (voir ci-contre)</b></p>	<p><b>Facteurs de succès bien remplis :</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1) <b>Expression claire des objectifs : l'ensemble des agents contributeurs connaît les objectifs du projet et y adhère</b></li><li>2) <b>Qualités des membres : ouverture, souci de l'intérêt collectif, compétences, personnalité</b></li><li>3) <b>Variété des membres : expérience, formation, culture</b></li><li>4) <b>Éthique : liberté d'expression, transparence</b></li><li>5) <b>Capacité d'auto-organisation : Mémoire partagée via les systèmes d'information :</b><ul style="list-style-type: none"><li>État d'avancement des modules</li><li>Listes et rôles des contributeurs</li><li>Qualité des versions livrées</li></ul></li><li>6) <b>Auto organisation : affectation des rôles</b></li><li>7) <b>Motivations (cf. p 5)</b></li></ol>




## 3.b. Théorie de l'évolution

- **Évolution des espèces par un processus itératif de :**
  - Création de nouveaux individus à partir d'individus existants par reproduction génétique, mutation ou échange de génomes
  - Sélection des plus aptes
  
- **Peut être appliquée à des objets quelconques**
  - par simulation
  - en définissant un code génétique basé sur leurs caractéristiques
  
- **Cas d'application de la théorie de l'évolution**
  - Problème d'optimisation :
    - Problème du voyageur de commerce qui parcourt les capitales des U.S.A.
  - Innovation
    - Conception d'un produit conforme à un cahier des charges  
Exemple : bras de manutention pour la NASA
    - Conception du style ou design d'un produit
      - L'informatique permet de créer de nombreux modèles à algorithmes génétiques
      - Sélection faites par des personnes

### 3.c. Hypothèse du « bord du chaos »\*

\* Source : Investigations (2000) – Stuart Kauffman

#### c.1. Description du « Bord du chaos »

	Etat d'un système		
	Désordre / chaos	Bord du chaos	Ordre
			
<b>Dynamique du système</b>	Effet papillon : petite perturbation ⇒ <b>impact considérable</b> <i>Système en turbulence</i>	Perturbation ⇒ <b>impact limité</b> pouvant être de longue durée <i>Point de basculement entre chaos et ordre</i>	Insensibilité du système aux perturbations ⇒ <b>retour rapide à l'état initial</b> <i>Système rigide</i>
<b>Auto-adaptation aux évolutions de l'environnement</b>		<b>Capacité d'adaptation et d'auto organisation</b>	
<b>Exemples</b>	Atmosphère <b>Fumée</b>	Systèmes vivants <b>Agglomération</b>	Structure hiérarchique <b>Cristal</b>

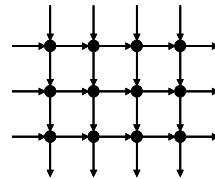
## c.2. Lois des systèmes au bord du chaos

### 1. Capacité de production d'émergences surprenantes

- Création, auto adaptation, auto organisation
- Renforcement de ces capacités par diversité des types d'agents
- Impact de perturbations, limité en nombre mais pouvant être durable

### 2. Facteurs favorables à l'ordre

- Faible nombre de liens entre les agents
- Rôle dominant d'une certaine influence sur les agents
- Règles de comportement des agents privilégiant un certain comportement



### 3. Cas des réseaux binaires (Reçoit stimuli binaires de « K » autres nœuds)

- Nombre de nœuds modifiés par une intervention  $< \sqrt{N}$
- Loi de puissance pour nb de nœuds modifiés par une intervention
- Résultats de simulations :  
**K > 2 : chaos ; K < 2 : ordre ; K = 2 : bord du chaos**

### 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**
- **Evolutions du projet**
- **Evolutions de l'environnement (Technologie, usages...)**

## Lois des systèmes au bord du chaos (suite)

### 4. Evolution du système et des agents

- **Complexité croissante :**

Nouvelles structures basées sur des combinaisons de structures existantes (molécules, cellules, êtres vivants, tribus, communautés, états, organismes supranationaux)



- Évolution spontanée vers un **nombre maximum de types d'agents**.
- Au-delà duquel l'introduction d'un nouveau type entraîne la **disparition d'un autre**.
- Les durées de vie des divers types d'agents suit un **loi de puissance**
- **Co évolution** des agents : Interdépendance et enrichissement réciproque
- Tropisme des systèmes, **vers le bord du chaos** (biologie, écosystème, sociologie, économie)



## c.4. Cas d'emploi de l'hypothèse du bord du chaos



### ➤ Explication du comportement d'un système

- Par son positionnement dans l'axe : ordre - chaos
- Grâce aux lois des systèmes dans les états « bord du chaos », ordre, chaos.

Exemples :

- Excès d'ordre peut expliquer l'effondrement d'une civilisation, d'une organisation (cf. URSS et US)
- Explication de la disparition d'un type de concurrents (nb maxi de types d'agents)

### ➤ Orientation des interventions dans un système

- Maintenir « au bord du chaos » pour en exploiter la capacité d'adaptation auto-organisation
- Inhiber son adaptation en le maintenant dans l'état d'ordre ou de désordre

Exemples d'intervention

- Ordre vers chaos : créer des liens d'influences sur les agents, inhiber l'influence dominante
- Chaos vers ordre : favoriser une influence dominante, supprimer des liens d'influence



### III. Quels outils parmi les disciplines ? (suite)

Discipline	Objectifs	Cas d'utilisation
<b>d. Logique, 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>• Systèmes peu dynamiques, agents peu évolutifs</li> <li>• <i>Exemple : propagation des engouements, des épidémies.</i></li> </ul>
<b>e. Simulation multi-agents</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prévoir les émergences.</li> <li>• Connaître le comportement dynamique du système ; identifier des interventions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systèmes très dynamiques, agents évolutifs</li> <li>• <i>Exemples : circulation des clients dans un grande surface ; évolution d'une ville</i></li> </ul>
<b>f. Théorie du chaos</b> <b>Pas traité dans ce document</b>	<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 pour lesquels des équations différentielles (non-linéaires) peuvent être définies et traitées</li> <li>• <i>Exemple : météorologie, Pb des 3 corps</i></li> </ul>

## d. Logique graphes et réseaux

### ➤ Recueillir des données sur les graphes

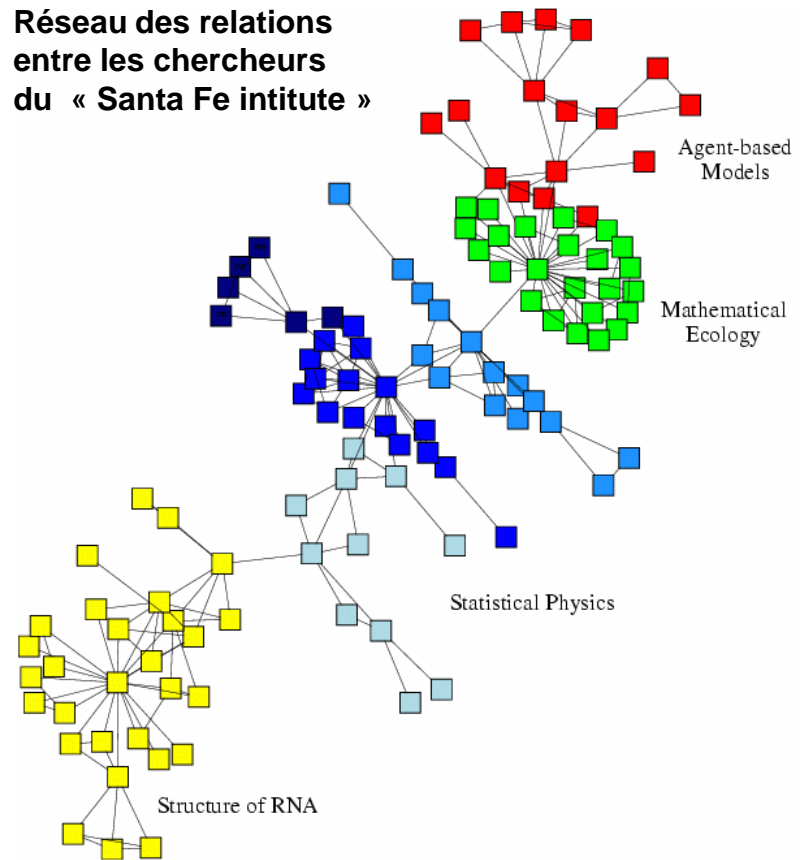
- Nombre de liens et de nœuds
- Liens forts et faibles
- Loi de répartition du nombre liens par nœud
- Distance moyenne entre les nœuds
- Les cliques

### ➤ Identifier les types de graphes

Exemples :

- Réseaux courte distance moyenne et égalitaire. Exemple réseau « small world » de Stogatz et Watt
- Réseau aristocratique à courte distance moyenne. Exemple : Réseaux de Bârabâsi créés avec des lois préférentielles d'attribution des liens aux nœuds.
- Réseaux hiérarchiques

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



## e. Simulation multi-agents



- La simulation multi-agents d'un système complexe
  - Permet d'analyser et de prévoir son comportement global
  - Palie l'impuissance des méthodes mathématiques
  - Est difficile à mettre en œuvre : risques d'écarts avec le système réel, longue analyse
  
- Contributions d'une simulation à l'étude d'un système complexe
  - Analyse et anticipation du comportement dynamique d'un système
  - Prévision des émergences
  - Identification d'interventions dans un système pour obtenir les émergences souhaitées :
    - Ajout ou suppression d'agents
    - Modification des règles de comportement des agents (sensibilité à des stimuli)
    - Modification de l'environnement
  
- Décrire le système, les agents et les règles est déjà riche d'enseignement

# Contributions de la Logique graphes et réseaux

## ➤ Identifier les propriétés du système,

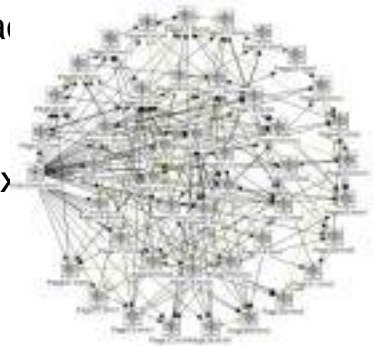
### Exemples

- 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

### Exemples

- Création de liens pour développer les propriétés « small world » et faciliter la propagation d'engouements
- Inhibition d'agents « connecteurs » pour réduire un contagion
- Suppression de liens pour fractionner un réseau en plusieurs réseaux isolés et réduire ainsi les capacités de propagation nuisibles



Ajoutée après la réunion

## IV. Résumé et conclusions

- A. 7 points à traiter : souvent en itération répétée, sans forcément suivre absolument l'ordre ci-dessous :
1. Sujet et objectifs
  2. Description du système, des sous-systèmes et des interfaces ; description de son comportement observé et des émergences à divers niveaux
  3. Description des agents et des règles d'interactions .
  4. Vérification qu'il s'agit d'un système complexe
  5. Choix d'outils dans les diverses disciplines et/ou utilisation d'analogies avec des systèmes déjà étudiés.
  6. Analyse avec les outils retenus et description et anticipation de l'évolution du système et définition éventuelle des moyens d'action
  7. Présentation du sujet enrichi par les sciences de la complexité

Ajoutée après la réunion

## B. Méthode alternative ou complémentaire

Une méthode qui semble prometteuse, serait de construire progressivement des fiches à la disposition des personnes voulant enrichir un sujet :

### 1. Fiches sur les disciplines (déjà commencé dans la présentation du 6 avril)

Intelligence collective

Théorie de l'évolution

Hypothèse « bord du chaos »

Logique, graphes et réseaux

Simulation multi-agents

Théorie du chaos

### 2. Fiches sur des systèmes déjà étudiés pour raisonnement par analogie

Propagation de messages ou de virus

Evolution biologique ou culturelle

Systèmes immunitaire, nerveux...

Système climatique

Ecosystèmes

Insectes coloniaux

Evolution d'une civilisation

Urbanisme et planning

## B. Trois questions à méditer



1. Pensez-vous exagérer le rôle du leader, des contrôles et des consignes de haut en bas ?



2. Faire évoluer un système vers le « bord du chaos » peut-il augmenter sa capacité de créativité et d'auto-adaptation ?



3. Sans faire de simulation, mais en décrivant les agents, le réseau et les règles de comportement d'un système pensez-vous apprendre beaucoup ?

