

# Complexité & émergence:

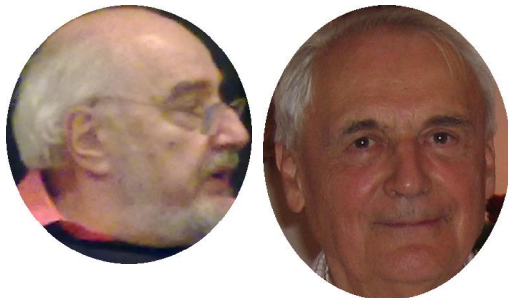
**Akoisaser ?**

# Les applications des sciences de la complexité

■ Quelques frustrations	3
■ A chacun sa complexité	8
■ Une petite méthodologie d'évaluation	16
■ Exemples:	
■ Economie (Jacques Bursztejn)	20
■ Télécom	24
■ Cosmologie	27
■ Annexes	



## Santa Café



Systemique  
Emergence  
Auto-organisation  
Catastrophes  
Algorithmique  
Etc.

Le 4 avril 2011 Philippe Picard

Akoassassertoussa?



# Une question d'actualité

## L'économie comme science "complexe"

*"Les sciences de la complexité ont le vent en poupe, notamment chez les adeptes des nouvelles technologies. La question est toutefois : servent-elles à quelque chose ? En clair, peuvent-elles prédire ? Ou sont-elles condamnées à produire des analogies et des graphismes, certes impressionnants, mais dont la valeur heuristique est nulle ou presque ?"*

**Rémi Sussan, LEMONDE.FR | 01.04.11**

# Les deux approches du groupe émergence

- Notre groupe Emergence pratique implicitement plusieurs approches:
  - Les réunions « **Santa Café** » qui approfondissent les principaux concepts et outils des sciences de la complexité ;
  - Les dîners « **Arts et Métiers** » qui abordent la complexité par domaine ;
  - Ces dîners frustrent souvent les plus assidus d'entre nous par le **manque de référence** aux outils que nous tentons de comprendre plus ou moins laborieusement ...
  
- Nous proposons modestement d'**atténuer nos frustrations** en explorant la question: "à quoi sert la complexité?" en croisant, sur des exemples, outils et domaines d'application ;

**Exemples de présentations excellentes  
mais frustrantes ... pour nous, les  
« émergents de la complexité » ... par le  
peu de références aux outils:**

**La complexité des crises financières et bancaires  
Modèles d'analyse économique et modèles de  
risques**



*Réunion « Emergence Paris » du 18 janvier 2010  
Frank TAIEB*

**Les sciences du cerveau**

*Réunion « Emergence Paris » du 18 octobre 2010  
Jean Claude PICARD*

# Références aux outils ?

Quelques exemples des archives du groupe émergence.

Date	Qui	Sujet	Ref *
déc 2004	Manfred Mack	Pensée complexe et approche dynamique de création de valeur	
avr 2006	Michel Bloch, Georges Lepicard	Enrichir un sujet au moyen des sciences de la complexité	
oct 2006	Yann Person -Jacques Piacentino	Réchauffement climatique. L'effet de Serre	
Sep 2008	Alain Lancereau et Martine Bonan	Urbanisme et Théorie de la Complexité Principes et Exemples	
nov 2008	Bernard Decugis	Mécanique Quantique Complexité et émergence I	
mar 2009	Philippe Picard	Télécom: réseaux auto organisés	
déc 2009	Bernard Decugis	Mécanique Quantique Complexité et émergence II	
jan 2010	Frank Taieb	La complexité des crises financières. Modèles d'analyse et de risques	
mai 2010	Jacques Bursztejn et Elie Amara	Evolution, complexity and the remaking of economics" de E. Beinhocker	
oct 2010	Jean Claude Picard	Les sciences du cerveau	
Jan 2011	Jacques Printz	Complexité, émergence, hasard, chaos, irréversibilité, ... dans les systèmes informatisés	

**Ref \* : référence aux outils de la complexité**

# A chacun sa complexité!

- Les sciences de la complexité regroupent un **ensemble hétéroclite d'outils** et de **concepts** sans unité apparente, sinon de s'appliquer là où les théories et outils classiques ne "marchent pas" ;
- Ce qui est **encourageant**, c'est que la plupart des concepts de la complexité s'appliquent à des domaines complètement distincts, de la biologie à la cosmologie, en passant par les télécom ou l'économie ;
- Mais notre attente pour certains domaines complexes est souvent déçue par le manque de résultats mesurables ;



# A chacun sa complexité!

- **La complexité, présente des approches multiples selon les auteurs et les disciplines:**
  - **Mathématiciens**
  - **Physiciens**
  - **Informaticiens**
  - **Systématiciens**
  - **Biologistes**
  - **Economistes**
  - **Sociologues**
  - **Philosophes**
  - **Etc..**
- **Elle englobe à la fois des concepts nouveaux (émergence, auto-organisation) et des extensions de théories souvent difficiles (physiques ou mathématiques) ;**

# De la difficulté de l'exercice

- Certaines difficultés de compréhension sont dues à notre **conditionnement culturel** (en particulier pour ceux qui en sont restés à leurs vieux souvenirs de sciences pas trop rafraichis!) ;
- On attend des sciences de la complexité quelque chose de comparable aux grandes théories classiques qui ont permis non seulement d'expliquer, mais aussi de prévoir et souvent de découvrir des nouveaux phénomènes ;
- La nature même des phénomènes étudiés via les outils de la complexité fait que les démarches classiques ne marchent pas !
- **Pense-t-on que les outils réussiront à faire des prédictions fiable en climatologie ou en sismologie ?**

# Il n'y a pas une mesure de la complexité

- Le sens commun tendrait à penser que le nombre d'objets d'un système pourrait être une bonne mesure. Il n'en est rien, par exemple:
  - Il y a environ  $10^{10}$  neurones dans le cerveau et  $10^{23}$  atomes dans un atome gramme de gaz (Avogadro) :
    - Le cerveau est effectivement l'objet le plus complexe que l'on connaisse;
    - Par contre la mécanique statistique a réduit la combinatoire apparente d'un gaz grâce aux probabilités;
  - Le problème des 3 corps est l'exemple célèbre qui a inspiré la théorie du chaos ;
- L'étude de la complexité a mis en évidence l'importance des interactions entre agents ;
- La mesure de complexité prend multiples formes, par exemple:
  - En algorithmique (calculabilité, Turing, Kolmogorov)
  - En théorie de l'information (entropie)
  - En géométrie (dimension fractale)

# **Indépendance entre phénomènes et outils ?**

- **Il est encore parfois difficile de distinguer les outils spécifiques de la complexité (mathématiques, outils informatiques, modèles conceptuels) et les phénomènes réels que l'on souhaite traiter à l'aide de ces outils ;**
- **De ce point de vue, la complexité ne se distingue pas des grandes théories scientifiques du passé pour lesquelles, selon les cas, les outils ont été créés pour les besoins de la théorie ou ont utilisé des outils mathématiques préexistants (voir annexe) ;**
- **Les outils de simulation informatique (automates cellulaires ou neuronaux) ont contribué à explorer les phénomènes complexes ;**

# Complexité et enseignement

- L'enseignement systématique de la complexité n'est pas encore très répandu en France \* (voir page Réseau National des Systèmes Complexes) ;
- Cependant, le sujet est souvent plus ou moins explicitement traité selon les domaines, par exemple :
  - Physique ;
  - Math. et algorithmique ;
  - Outils de simulation ;
  - Mathématiques financières ;
  - Sociologie ;

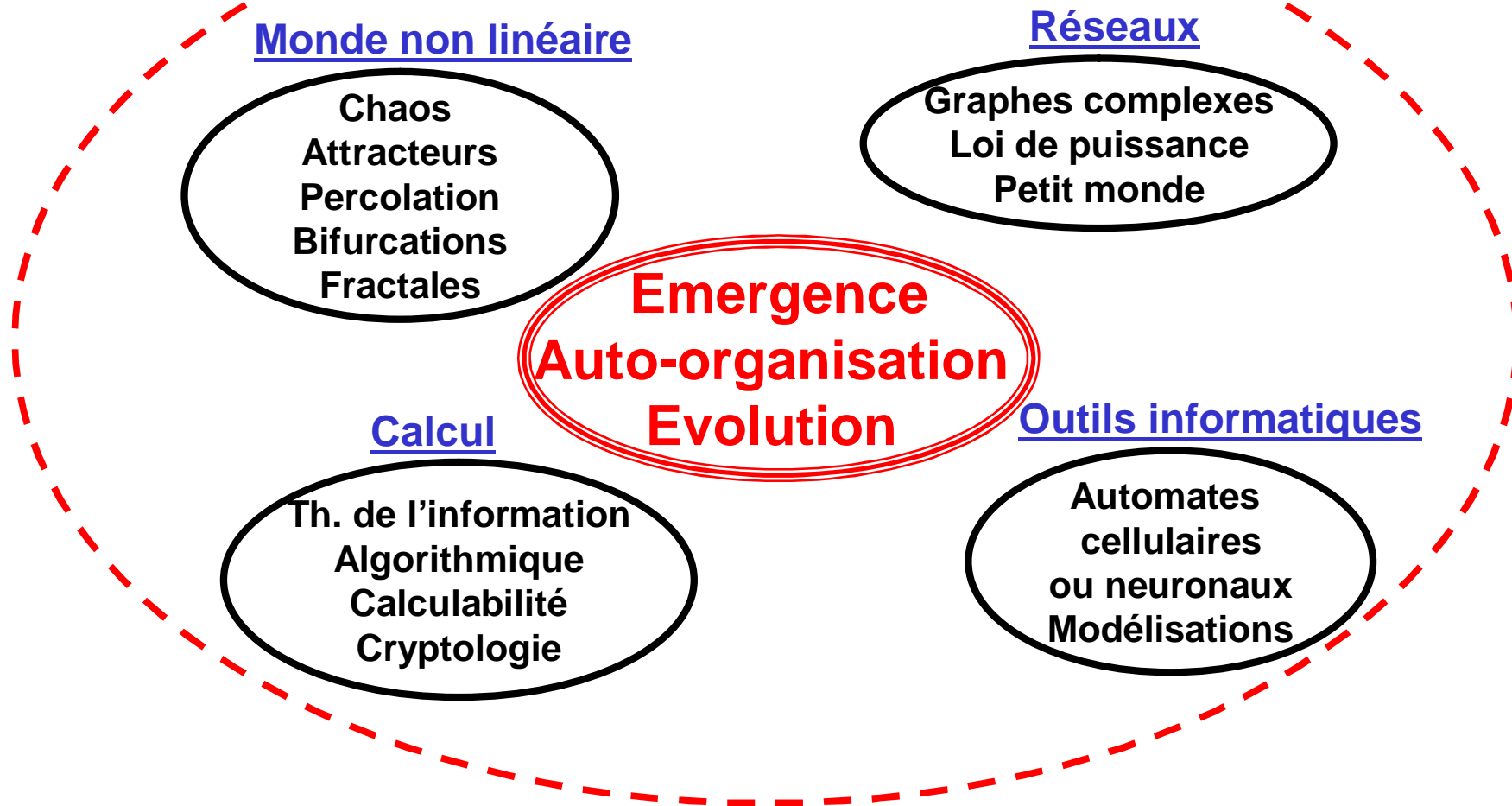
\* Aux US, citons le "New England Complex System Institut " ;

# Complexité et enseignement (ex)

- **EHESS**, géométrie de la complexité, éco dynamique et ex. en écologie ;
- **Paris 6 (UPMC)**, modélisations multi agents (économie, sociologie) ;
- **IMA**, cours de systémique :
  - outillage (AC, RN, L-systèmes, Algorithmes génétiques,...)
  - complexité avec "témoignages" dans divers domaines (mktg, réseaux, industrie, écologie, informatique)
- **X**, cours dédié, en application de la physique et de l'algorithmique ;
- **Centrale**, pas de cours identifié, mais les principales notions enseignées (physique, algorithmique) ;

# "Ma" complexité

Systemique



# Utilité des outils de la complexité

Quels outils utilisés ?

	Emergence	Physique non linéaire	Calcul	Réseaux	Outils et automates
Biologie cellulaire					
Climatologie					
Cosmologie					
Economie, Finance					
Génétique					
Géophysique					
Informatique: data mining					
Informatique: systèmes complexes					
Linguistique					
Neurologie					
Réseaux de télécom					
Sociologie					
Transports					
Urbanisme					

Quelle utilité, selon l'échelle d'évaluation:

- i.** Comprendre et expliquer
- ii.** Modéliser (« what if ») et simuler
- iii.** Modéliser (prévoir)
- iv.** Découvrir des nouveaux phénomènes
- v.** Agir



# Domaines d'application

De nombreux domaines sont considérés comme justifiant l'approche de la complexité :

- Biologie cellulaire
- Climatologie
- Cosmologie
- Economie, Finance
- Génétique
- Géophysique
- Informatique: data mining
- Informatique: maîtrise des systèmes complexes
- Linguistique
- Neurologie
- Réseaux de télécom
- Sociologie
- Transports
- Urbanisme
- Etc, etc

# **Un petit début**

- **Economie (Jacques Bursztejn)**
- **Cosmologie**
- **Télécom**

# Economie et complexité

## Econophysiciens

Outil	Utilité
Systemique, émergence, auto-organisation	<b>Oui</b> : endogène, milieu instable, feedback, loops, black swan
Evolution	<b>Non</b>
Catastrophe, chaos, attracteurs, bifurcations	<b>Oui</b>
fractales	<b>Oui</b> , loi de puissance
Graphes et réseaux complexes	<b>Non</b>
algorithmique	<b>Oui</b> , math financières
Outils de simulation	<b>Oui</b> , simulations multi-agents, physique du solide
Théorie de l'information	<b>Oui</b> , bases de données

# Economie et complexité

## Néokeynésiens

Outil	Utilité
Systemique, émergence, auto-organisation	<b>Oui</b> : endogène, milieu instable, feedback, loops, black swan
Evolution	<b>Non</b>
Catastrophe, chaos, attracteurs, bifurcations	<b>Oui</b>
fractales	<b>Oui</b>
Graphes et réseaux complexes	<b>Oui</b>
algorithmique	<b>Oui</b>
Outils de simulation	<b>Oui</b> , agents ?
Théorie de l'information	<b>Oui</b> , bases de données HF

# Economie et complexité

## Evolutionnistes

Outil	Utilité
Systemique, émergence, auto-organisation	<b>Oui</b> : endogène, milieu instable, feedback, loops, black swan
Evolution	<b>Oui</b>
Catastrophe, chaos, attracteurs, bifurcations	<b>Oui</b>
Fractales	<b>Oui</b> , loi de puissance
Graphes et réseaux complexes	<b>Oui</b>
Algorithmique	<b>Oui</b> , algorithme de l'évolution
Outils de simulation	<b>Non</b>
Théorie de l'information	<b>Oui</b> , bases de données HF

# Economie et complexité: synthèse

	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>
<b>ECONOPHYSICIENS</b>	4	4	5	4	5
<b>EVOLUTIONISTES</b>	5	5	2	3	3
<b>NEO KEYNESIENS</b>	4	4	5	5	5

## ECHELLE :

0 INUTILE

1

2

3 UTILE

4

5 INDISPENSABLE

- I.** Comprendre et expliquer
- II.** Modéliser (« what if ») et simuler
- III.** Modéliser (prévoir)
- IV.** Découvrir des nouveaux phénomènes
- V.** Agir

# Complexité appliquée aux télécom

- Les télécom ont été à la source de plusieurs disciplines liées à la complexité, dont la théorie de l'information.
- Internet a introduit dans les télécom une nouvelle classe de problèmes liés à l'auto-organisation et aux graphes complexes (graphes de terrain) avec 3 propriétés liées :
  - Loi de puissance de la distribution des arêtes par nœud ;
  - Propriété du petit monde ;
  - Structure fractale (auto similarité) ;

# Complexité appliquée aux télécom

- **Plusieurs concepts et techniques sont directement utilisés dans les télécom modernes:**
  - **Algorithmique appliquée au routage IP (intra-domaines, inter-domaines) ;**
  - **Algorithmique et calculabilité appliquées à la cryptologie ;**
  - **Graphes de terrain (IP, WEB) ;**
  - **Percolation et résilience ;**
  - **Auto organisation (routage, réseaux ad'hoc) ;**
  - **Fractales (compression d'images) ;**



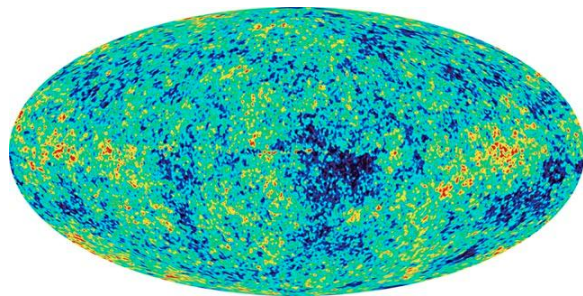
# Télécom et complexité: synthèse

	I	II	III	IV	V
<b>Emergence</b>					
Systémique					
Emergence					
Auto-organisation	■				
Evolution					
<b>Physique non linéaire</b>					
Chaos, attracteurs					
Bifurcations					
Percolation	■			■	
<b>Calcul</b>					
Théorie de l'information	■			■	
Algorithmique				■	■
Calculabilité				■	■
<b>Réseaux</b>					
Graphes complexes	■			■	■
Loi de puissance	■				
Petit monde	■				
Fractales					
<b>Outils de simulation</b>					
Modélisations			■	■	
Automates cellulaires			■	■	
Automates neuronaux					

- I. Comprendre et expliquer
- II. Modéliser (« what if ») et simuler
- III. Modéliser (prévoir)
- IV. Découvrir des nouveaux phénomènes
- V. Agir

# Cosmologie

- La cosmologie utilise l'ensemble des outils de la physique moderne (mécanique quantique et surtout relativité générale) ;
- L'expansion de l'univers et le Big Bang sont à l'heure actuelle les meilleurs modèles explicatifs de l'évolution de l'univers ;
- Il y a souvent la tentation de mélanger cosmologie et métaphysique ou religion: ça n'a jamais marché!



# Et la complexité dans tout ça?

- La lecture du petit livre ci-contre est recommandée.
- Ce livre résume les points de vue de savants de disciplines variées ;
  - Ils ont chacun leur démarche philosophique, mais refusent de mélanger science et religion ;
  - Ils font tous appel aux mêmes concepts de la complexité: **auto-organisation, émergence, sensibilité aux conditions initiales** ;



**Le monde s'est il créé tout seul ?**

Patrice Van Eersel

© Albin Michel/C.L.E.S., 2008

Livre de poche N°31748

# Trinh Xuan Thuan

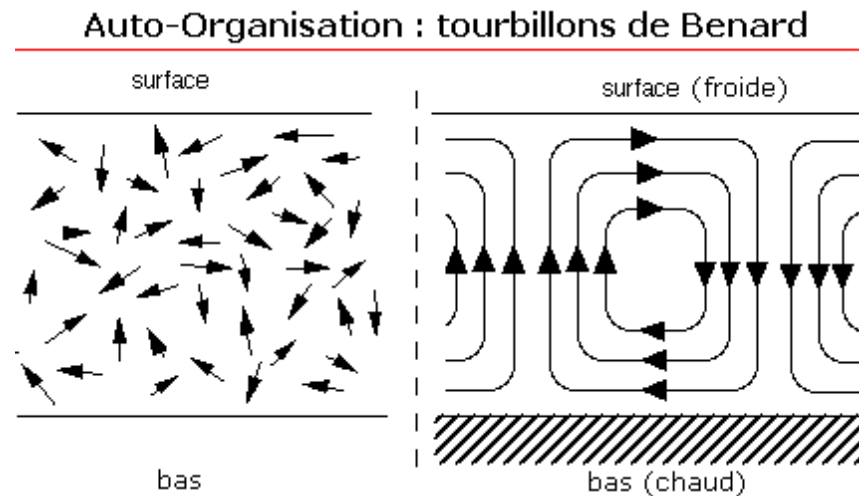
- La théorie du big bang a été confortée en 1965 avec la découverte des rayonnements fossiles (à partir  $T_0 + 380\,000$  ans) ;
- Le principe anthropique (controversé) dit que la probabilité des conditions initiales ayant permis l'évolution de l'univers tel qu'il est devenu était de  $10^{-43}$  (**importance des conditions initiales**) ;
- Une théorie au firmament du paradigme scientifique contemporain: l'auto-organisation ;

# Ilya Prigogine

- La physique classique, de Newton à Einstein, en passant par la mécanique quantique habituelle rassemble des théories réversibles et déterministes. En thermodynamique apparaissent des points de bifurcation ;
- Dans la plupart des systèmes, la probabilité est **irréductible**. Cela découle de l'une des grandes découvertes de Poincaré: la classification très importante entre systèmes intégrables et non intégrables ;

# Ilya Prigogine

- Exemple d'auto-organisation: tourbillons de Benard :



- Dans un monde déterministe, il y a peu de créations ;
- Dans un monde formé de systèmes non intégrables, il y a une création continue: le monde est un système de création auto-organisée ;

# Henri Atlan

- Après une quarantaine d'années d'usage abusif, la métaphore du programme, sur le modèle des programmes informatiques, est aujourd'hui de plus en plus évacuée de la biologie ;
- Elle est remplacée par les «  **systèmes dynamiques complexes**  » ;
- L'auto-organisation était déjà en germe dans la première cybernétique de Wiener ;
- On parle maintenant de « seconde cybernétique » , celle des  **systèmes auto-organiseurs**  ;
- Entre le cristal et la fumée, se trouve « cette énigme qui apparaît dans la catastrophe, la turbulence, la dispersion : l'organisation ». Les recherches sur l'origine de la vie utilisent des modèles d'auto-organisation de la matière ;





# A retenir

- **La complexité regroupe un ensemble de concepts et d'outils multiples avec, à leur cœur, l'émergence et l'auto-organisation ;**
- **Ces concepts et outils sont utilisés dans de très nombreux domaines, des sciences dures à la sociologie en passant par la biologie ;**
- **L'évaluation de leur utilité et de leur efficacité ne fait pas l'unanimité ;**
- **Une grille d'analyse est proposée, et illustrée sur trois premiers domaines: cosmologie, télécom, économie ;**
- **Prochains secteurs étudiés ?**



© Colorpic.be

**En espérant ne pas avoir enfoncé trop de portes ouvertes!**

# Annexes

- **Outils mathématiques pour la physique classique;**
- **Complexité et enseignement**
- **Algorithmes de routage**
- **Sciences Humaines et Sociales et complexité**

# Outils pour la physique « classique »

Exemple de théorie physique	Outils mathématiques
Gravitation universelle (Newton)	Calcul différentiel et intégral (théorie des fluxions créée par Newton, en parallèle avec Leibnitz)
Mécanique statistique (Maxwell, Boltzmann)	Outils préexistants: probabilités,
Relativité générale (Einstein)	Outils préexistants: Calcul tensoriel (R. Ricci et T. Lévi Civita), géométries non euclidiennes (Riemann)
Mécanique quantique (Schrödinger, Heisenberg, etc...)	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Outils préexistants: probabilités, transformation de Fourier, espaces de Hilbert, mécanique analytique</li><li>■ Outils contemporains: théorie des distributions (Laurent Schwartz), formalisme de Dirac</li></ul>

# Complexité et enseignement (1)

## X: cours de systèmes complexes

L'objectif du cours **systèmes complexes** est de montrer comment les modèles et les méthodes de la physique statistique peuvent se décliner et trouver des applications intéressantes dans d'autres domaines où la notion de complexité est pertinente (biologie, informatique, économie, finance,...).

### 1. Probabilités et statistiques

Notions de base. Loix étroites, loix larges, loix de puissance. Sommes et max. Records. Théorème de la limite centrale. Entropie et mesure de diversité. Loix multi-variées et corrélations. Matrices aléatoires.

### 2. Mouvement Brownien, Equation de Langevin et de Fokker-Planck, Diffusion anormale

Mouvement Brownien, Equation de Langevin et de Fokker-Planck. Etat d'équilibre vs. Etat stationnaire. Loi d'Arrhenius. Equation de Langevin pour un champ (densité, interfaces, magnétisation, etc.). Migrations et multiplications : dynamique de populations, croissance de villes, dynamique de répartition. Diffusion anormale : mécanismes et exemples.

### 3. Séries temporelles complexes, intermittence, turbulence

Quelques exemples : séries temporelles (turbulence, finance), séries spatiales (fronts, fracture). Méthodes d'analyse : variogramme, spectre de puissance. Scaling dynamique et loix d'échelle. Séries temporelles complexes : Turbulence et Intermittence. Chocs et Trafic Routier.

### 4. Optimisation, systèmes à minima multiples

Optimisation : exemples. Chemins optimaux et états métastables. Phénoménologie générale des systèmes à minima multiples et diverses applications. Hystérèse. Avalanches. Verres et verres de spin. Modèles des énergies aléatoires. Dynamique lente, bruit en  $1/f$ . Non-équilibre, vieillissement.

# Complexité et enseignement (2)

## X: cours de systèmes complexes

### 4. Cavité, Belief Propagation et Codes

Modèles d'optimisation et codes corrections d'erreur. Bases de la théorie de l'information. Bethe-Peierls et Belief Propagation, applications diverses. Paysages dans l'espace des phases et transition de complexité.

### 5. Effets collectifs

Modèle d'opinion avec imitation : Ising, Ising en champ aléatoire, transitions de phases. Bouche à oreille et diffusion des innovations, ségrégation. Formation de structures. Percolation et applications diverses.

### 6. Réseaux

Réseaux divers : réseaux sociaux, internet, communication. Dynamique de formation. Propagation d'épidémies. Effet petit monde. Google. Modèles de coagulation/fragmentation.

### 7. Finance et économie : méthodes de physiciens

Phénoménologie des marchés financiers – statistique des prix, intermittence. Ordres de grandeur. Bulles et krachs. Modèles simples de rétroaction. Modèles d'agents en interaction. Marchés dérivés : futures, options. Stratégies de couverture. Méthodes d'optimisation fonctionnelles. Black-Scholes : mythe et réalité. « Smile » de volatilité. Offre et demande et mécanismes de formation des prix : microstructure des marchés. Impact et transactions optimales.

# Complexité et enseignement (3)

## Ecole Centrale

Pas de cours explicite lié à la complexité, mais:

- **Nombreuses bases théoriques dans les cours:**
  - Physique moderne
  - Algorithmique, calculabilité, théorie des graphes
  - Modélisation multi agents
- **Méthodologie de la complexité appliquée aux domaines de l'innovation:**

SH3300 Séminaires Innovation et complexité	20
SH3301 Innovation et complexité — Sociologie de l'Innovation	20
SH3302 Innovation et complexité — Science et société	20
SH3303 Innovation et complexité — Le design : comprendre et expérimenter une autre méthodologie	20
SH3304 Innovation et complexité — Communication, Innovation Entrepreneuriat	21
SH3305 Innovation et complexité — La bioéthique	21
SH3306 Innovation et complexité — Synchrotron	21
SH3307 Innovation et complexité — Créativité et Innovation dans et par le groupe	21

# Complexité et enseignement (4)

**EHESS:**

## Géométrie de la complexité, écodynamique

- Plutôt que d'aborder le thème de la complexité d'un point de vue abstrait et/ou générique, nous chercherons à le relier aux questions cruciales de la biodiversité et de la « soutenabilité » environnementale (interactions entre écosystèmes et formes de vie). En plus de quelques clés de lecture théoriques concernant des aspects fondamentaux des systèmes complexes (de la biologie à la perception), nous présenterons également des propositions concrètes relatives aux trois problèmes suivants :
  - (i) la récupération et requalification des sols ;
  - (ii) la gestion de ressources hydriques et la distribution de l'eau potable ;
  - (iii) l'utilisation des biomasses dans l'agriculture. De cette manière, on cherchera à établir une corrélation entre la validité des modèles théoriques (fondés sur certains nouveaux paramètres morphologiques-qualitatifs et des indicateurs écodynamiques) et leur impact sur les milieux naturels et sociaux et sur la qualité de la vie.



# Routage IP: 2 familles d'algorithmes

	Etat de lien	Vecteur
<b>IGP</b>	<b>OSPF</b> Dijkstra	<b>RIP</b>
<b>EGP</b>		<b>BGP</b> Ford Bellmann

Si **N** désigne le nombre de noeuds du graphe et **A** le nombre d'arcs:

- L'algorithme de **Dijkstra** est en  $O((N+A) \times \log A)$ , c'est-à-dire  $O(N^2 \times \log N)$  pour un graphe dense
- L'algorithme de **Ford Bellmann** est en  $O(N \times A)$ , c.a.d  $O(N^3)$  pour un graphe dense

Ces algorithmes sont dits **gloutons** (optimisation par étapes)