

Les systèmes complexes dynamiques

Groupe Émergence Paris

Michel Bloch

en collaboration avec Georges Lopicard
et les conseils d'Alexandre Makarovitch

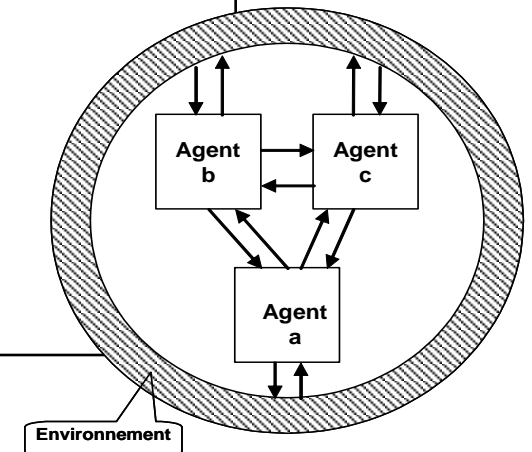
Introduction...

- **Nouveau domaine** étudiant comment les parties (agents) d'un **système dynamique** donne naissance à un **comportement global inattendu**
- **Nouvelle approche, pluridisciplinarité** : biologie, écologie, sociologie, urbanisme, physique...





Interactions entre agents autonomes et avec leur environnement

Émergence = propriétés résultant des interactions
= difficiles à prévoir

- ⇒ Causes et effets non reliés d'une façon évidente
- Effets non proportionnels aux causes



Monde réel mal décrit par physique et maths classiques

Outils classiques	□ Monde réel □	+ Nouveaux outils
<p>Formes régulières / lisses (Euclide) Courbes continues et dérivables</p>		<p>Rugueux (Mandelbrot) géométrie fractale Auto similarité</p>
<p>Effets proportionnel aux causes Calculabilité (Newton) Prédictibilité</p>		<p>Non linéarité (Poincaré) Formes (Wolfram) Imprédictibilité</p>
<p>Centre de Contrôle (Taylor)</p>		<p>Auto-organisation (A. Smith) Réseaux / Relations</p>
<p>Réductionnisme (Descartes) $S = \{A, B, C\}$</p>		<p>Holisme (Santa Fe) $S = \{(A, B, C) ; (AB, AC, BC) ; (AE, BE, CE)\}$</p>

De perplexité à complexité...

Table des matières

Introduction

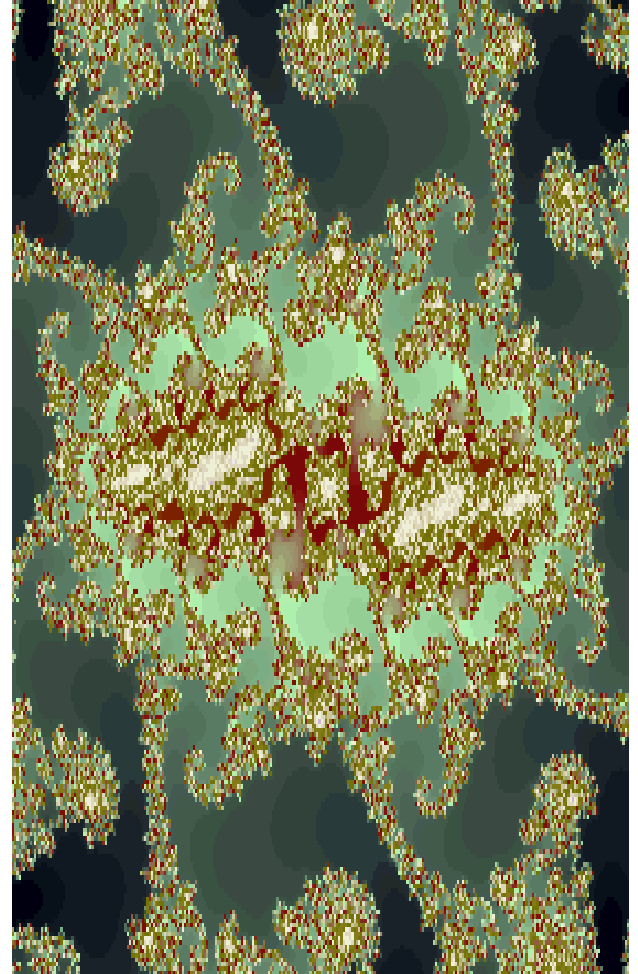


I. Systèmes complexes dynamiques

Démonstration proies / prédateurs

II. Outils des sciences de la complexité

III. Et l'avenir...

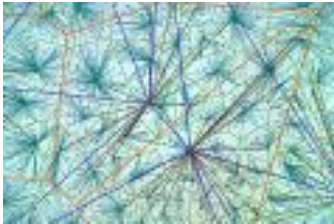


I. Systèmes complexes dynamiques

(1) Définition

➤ Constitués d'éléments autonomes (agents) interagissant entre eux

- Insectes : fourmilière, ruche / Poissons, oiseaux : bancs, envolées
- Espèces : écosystème ▪ Masses d'air : climat
- Individus : foule (panique), bande (lynchage), marché (prix)...



➤ ***Les systèmes complexes, et les Réseaux sont présents partout !***



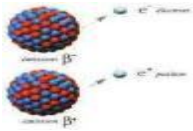



➤ Comportement global pas déductible de celui des éléments

- « Le tout est supérieur à l'ensemble des parties »
- En pratique non déterministe : Cl peu différentes → émergence très différente
- Des règles simples peuvent produire des émergences très complexes

(2) Émergence

L'émergence = résultat spontané, au niveau d'un système complexe, du processus exécuté par des agents en interaction à un niveau inférieur.

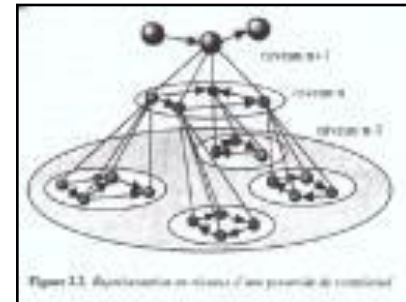
Élément	Interactions	Émergence
	Intensité des odeurs (Pheromones)	Fourmilière, ruche Recherche de nourriture, éviction des cadavres...
		Franchissement d'un seuil de sensibilité : spécialisation
	Vue ; Ouïe 3 règles : Séparation / Alignement / Cohésion	Envolées d'oiseaux (ou bancs de poissons) Survie (voyage groupé, évitement de collisions)
	Règles de la mécanique quantique	Physique classique Température / Pression / Couleur / Position précise
	Stigmergie (à travers l'environnement)	Marchés Prix de marché
	Imitation	Engouement

(3) Systèmes complexes auto adaptatifs (CAS)

Dominant dans le monde du vivant et organisations sociales

➤ Propriétés des CAS

- Auto organisation sous optimale (imparfaite mais plus robuste que concurrents)
- Auto adaptation, Auto apprentissage, Co-évolution
- Système gigogne (système = sous-système d'un autre système : Ville)



➤ Caractéristiques des agents



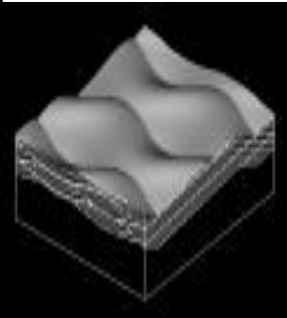
- Variété d'agents et interactivité
- Agents autonomes (pas d'autorité supérieure : Marchés boursiers)

➤ CAS situés au bord du chaos

- Entre « équilibre = mort » et « chaos = disparition du système »



(4) Approches des systèmes complexes

Approche	Définition	Forces Faiblesses
	<p>Chaos Formalisation au moyen d'équations non linéaires</p>	<p>Applicable à certains systèmes (météo, écoulement des fluides...) Difficultés si agents et types d'interaction variés</p>
	<p>Théorie des graphes Représentation graphique des nœuds (agents) et liens d'interaction</p>	<p>Identification de propriétés d'un système : propagation, robustesse, connecteurs Pas pour étudier le comportement dynamique</p>
	<p>Simulation multi-agents Caractéristiques des agents et des interactions ⇒ comportement dynamique</p>	<p>Adapté à variété : agents et types d'interaction Étude du comportement dynamique Difficulté de représenter la réalité</p>

Démonstration simulation : prédateurs / proies

Moutons : **bleu**
 Loups : **rouge**
 Herbe : **verte**

Paramètres

Interactions entre les loups, les moutons et la prairie

Résultat :
 Courbes des populations



Scénario	Moutons			Loups			Durée pousse herbe	Commentaires
	Nbr. init.	Gain énergie	Taux repro.	Nbr. init.	Gain énergie	Taux repro.		
Forte fertilité de la prairie	100	4		50	20	5 %	Rapide 15	<i>Extinction des loups après de fortes oscillation des populations</i>
Fertilité moyenne de la prairie			4 %				30	<i>Maintien des deux populations avec des fluctuations</i>
Faible fertilité prairie et fort taux de reproduction des moutons			Très élevé 20 %				Lente 50	<i>Extinction des moutons puis des loups après de fortes oscillations</i>

(5) Auto-organisation

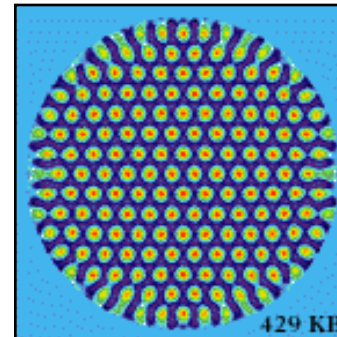
➤ **Auto organisation** : Ex. fourmilière, ville

- Émergence spontanée d'ordre en fonction de changements dans l'environnement
- Diversité d'agents et évolution du nombre d'agents
- Autonomie (comportement de l'agent contrôlé par son action) + évolutif



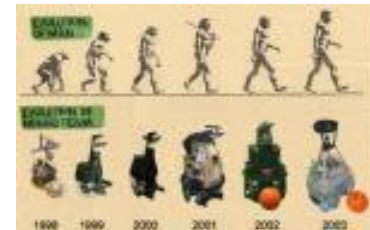
➤ **Caractérisée par des formes**

- Cellules de Bénard
- + ou – répétitives et + ou – régulières
- Organisation des villes



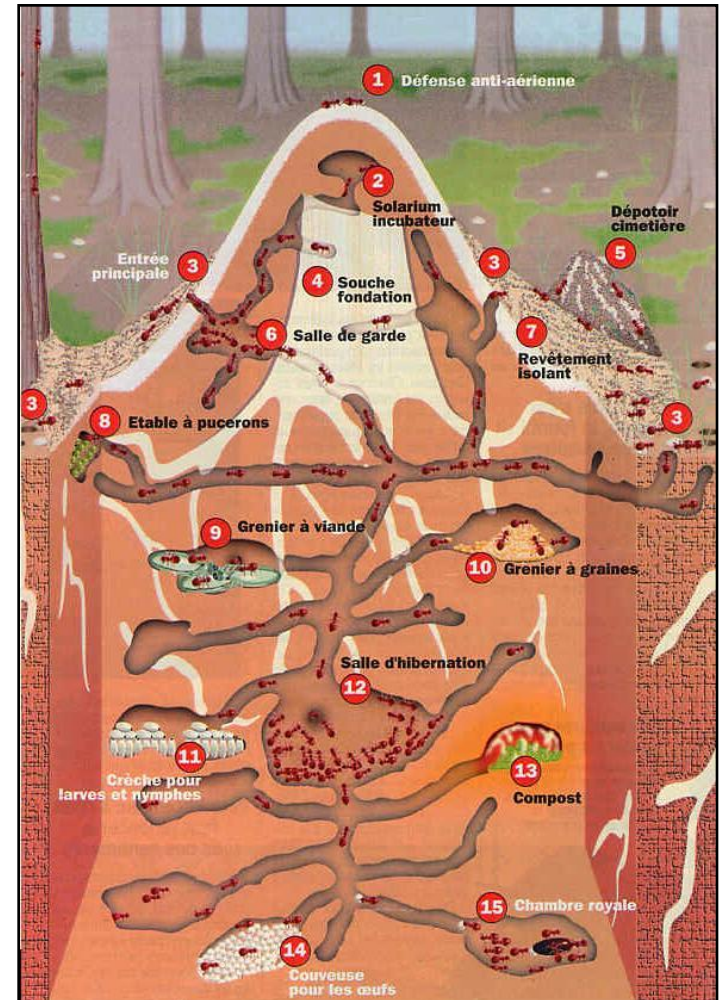
➤ **Darwinisme + complexité**

1. Auto-organisation : définit les formes possibles
2. Sélection : affine le choix des formes les plus aptes
3. Co-évolution des espèces (symbiogénèse)



Exemple de la fourmilière : ni manager, ni plan

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



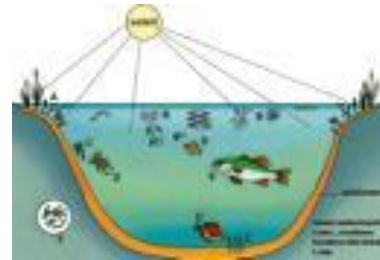
(6) Co-évolution

- 2 ou plusieurs agents (ou sous-systèmes) ont une **influence réciproque significative** sur leur évolution respective

- **Espèces dans un écosystème**

- Insectes vivant des produits du figuier et aidant à sa pollinisation
- Acheteurs / vendeurs

Caméléon sur un miroir



- **Gaïa = planète terre: vie / atmosphère / terre**

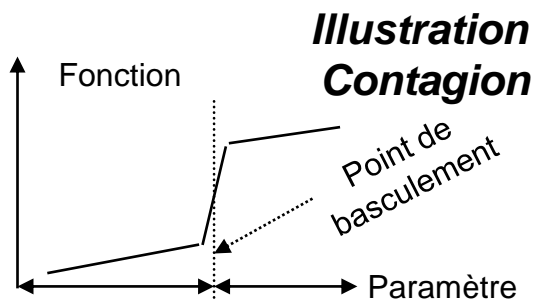
- Atmosphère créée et régulée par la vie (boucles de feedback)
- Temp. stable depuis $4 \cdot 10^9$ ans
- Structure dissipative (Ilya Prigogine)
- Simulation : monde des marguerites





(7) Point de basculement

- **État d'un système où une petite cause peut avoir un effet important**
 - ⇒ Modification continue de la valeur d'1 paramètre → changement de phase
- Changement d'états solide, liquide ou gazeux à une temp.
- Boutons tirés au sort /attachés entre eux :
 $Nb \text{ liens} / Nb \text{ boutons} > 0,5 \Rightarrow$ chaîne relie presque tous le boutons



<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 »

- Lorsque le % de personnes adhérant à une conviction, basculement brutal vers une propagation générale : loi de Franck 30%

II. Outils de la complexité

(1) Non-linéarité et attracteurs

➤ « Petites causes, grands effets »

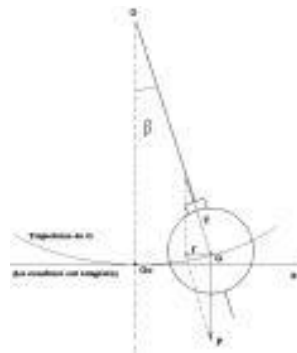
- Pour au moins une des variables effets non proportionnels aux causes
- Difficiles / impossibles à résoudre → simulation sur PC (PC ①① lunette pour Galilée)

➤ **Attracteurs :**

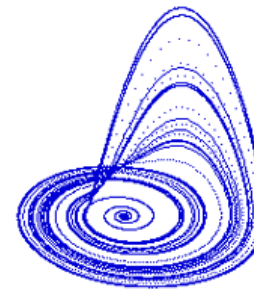
- Domaine de convergence du système dans un espace défini par des paramètres du système



Attracteur ponctuel



Attracteur périodique



Attracteur étrange

(2) Feedback

Forme d'interaction très importante dans les systèmes complexes

➤ Une fraction du signal produit par le système agit sur son fonctionnement

- **Feedback négatif** en cybernétique : effet modérateur
Feedback de régulation (vitesse)
- **Feedback positif** : effet amplificateur
Feedback de divergence (résonance entre un pont et des marcheurs)



➤ Exemples marketing dans un réseau

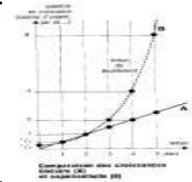
- Positif : engouement par imitation des autres
- Négatif et positif : fixation des prix par offre / demande (surcapacité / pénurie)

➤ Importance centrale pour les propriétés des CAS

- Auto-organisation
- Co-évolution
- Auto-administration
- Sélection



(3) Loi de puissance

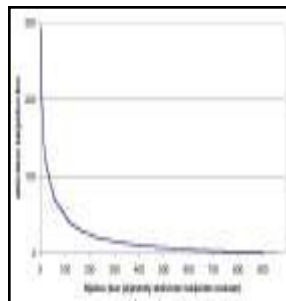
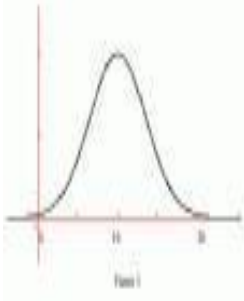


➤ **Courbe en cloche (événements indépendants)**

- Ex : (+ grand) / (+ petit individu) $\ll 4,8 \Rightarrow$ **Valeurs organisées autour d'1 moy.**

➤ **Loi de puissance (événements liés)**

- écarts extrêmement grands (sans échelle propre : tout ordre de grandeur)
- valeur moyenne = f(taille de l'échantillon)
- $y = C.X^{-\alpha}$ (différent de e^x) \Rightarrow **Quelques nœuds avec énormément de liens**

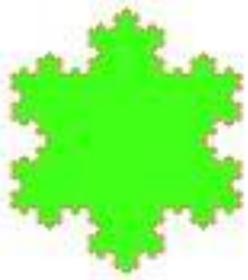


Lois de puissance dominante dans les CAS

- Richesse des familles (Pareto)
- Population des villes
- Nombre de visites d'1 site Web
- Taille des fichiers d'ordinateur
- F(mots) dans ttes les langues * F(noms)
- Nb d'exemplaires de livres, disques vendus

(4) Objets Fractals

- **Auto-similarité** : zooms successifs sur la figure → même motif
 - Flocons de neige, nuages, pliures du cerveau, cours du coton, courbe de Koch
 - Brindille, branche, grosse branche, branche maîtresse, arbre



- Leibnitz : autosimilarité (1700) ; Mandelbrot : objets fractals (1975)
- **Les SC peuvent produire des objets fractals** (ex. cours de bourse)

Discussion



Les sciences de la complexité sont-elles utiles ?

Dans quels domaines sont-elles effectivement utilisées ?

Les sciences de la complexité expliquent-elles les avantages de la décentralisation dans une société de plus en plus complexe (importance des interactions locales) ?

III. Et l'avenir... 1) Technologie de la complexité

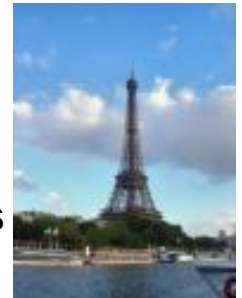
➤ Méthode générale (investissement important)

1. Décrire l'objectif et l'essence du problème
2. Définir le système et l'environnement (périmètre)
3. Définir les agents et règles d'interaction entre agents
4. Rechercher des données cohérentes et fiables
5. Exploiter les méthodes (réseaux, simulation, fourmis, reproduction...)
6. Analyser pour pertinence Vs cas connus, cas extrêmes, paramètres et règles...



➤ Conseils spécifiques pour le Groupe « Émergence Paris »

- **Éviter** : (1) Mon sujet (2) La complexité
- **Intégrer intimement sujet / propriétés des systèmes complexes**
 1. Définir le système complexe adaptatif correspondant au sujet
 2. Enrichir le sujet au fur et à mesure grâce aux propriétés des CAS
 3. Conclure sur le sujet en montrant l'apport des sc. de la complexité



2) Trois remarques sur l'avenir

1. *Sciences de la complexité* \Rightarrow *Nouveau paradigme*

Sciences Classiques	Sciences de la complexité
Plutôt Quantitatif	Plutôt Qualitatif
Étude d'objets	Étude de Relations
Étude de Substances	Étude de Formes

2. *Prédictibilité et connaissance des causes limitées,*

mais l'on progresse sur des sujets difficiles

Espèces stables des millions d'années disparaissent rapidement !

URSS stable pendant 70 ans explose en quelques mois en 1989 !

Engouement subit pour un produit qui végétait !



3. *Une révolution scientifique prend du temps !*

