

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

Section 1 : Plan, Objectifs, Résumé, Les systèmes complexes

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

1) Objectif de ce document

- **Ce document a été créé...**
 - **pour permettre aux membres du groupe Emergence Paris de réviser les concepts utiles à l'étude des émergences dans les systèmes complexes**
- **Son objectif est donc de...**
 - **définir les systèmes complexes et tout particulièrement les systèmes complexe adaptifs**
 - **décrire les outils et méthodes permettant de mieux comprendre leurs comportements**
 - **montrer des exemples d'applications**

2) Résumé

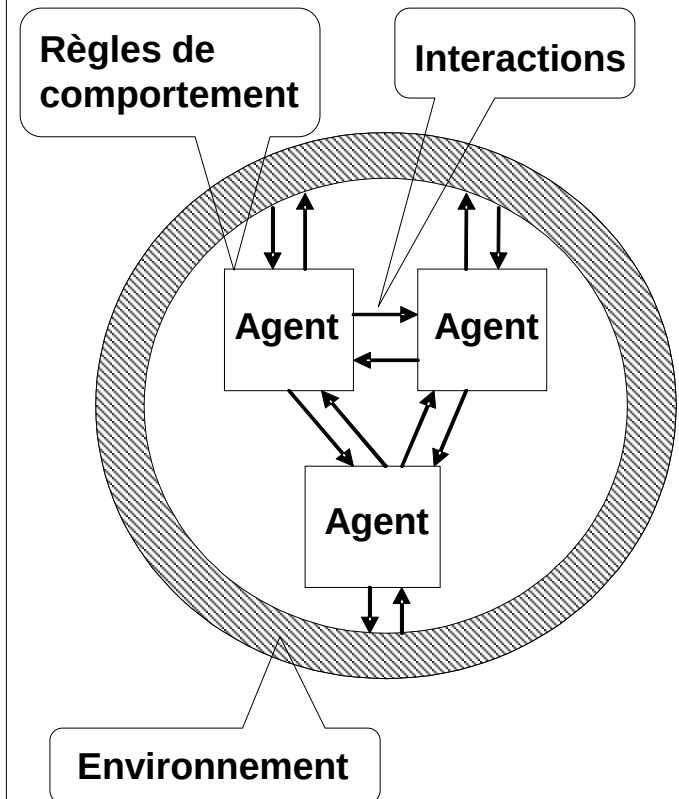
- Introduction
- Les systèmes complexes et émergence
- Objectifs des spécialistes de la complexité
- Historique de la complexité
- Le paradigme des systèmes complexes
- Evolution vers une complexité croissante
- Concepts les plus utilisés

2-1) Introduction

- Vous entendez parler de : systémiques, sciences de la complexité, étude des **systèmes dynamiques**, théorie du chaos, études des émergences...
- Toutes ces disciplines ont pour but l'étude des **systèmes complexes** dans lesquels les **interactions entre les parties** (agents) donnent naissance à un **comportement global inattendu**
- Les systèmes complexes sont présents partout ; ces nouvelles approches envahissent donc **toutes les disciplines** :
 - Biologie, écologie, sociologie, marketing, urbanisme, physique, chimie, mathématiques, robotique et robotique de groupe...
- Les propriétés nouvelles qui apparaissent au niveau système sont appelées **Émergences** ➔

2-1) Systèmes complexes et émergence

- **Les systèmes complexes sont constitués d'agents en interaction :**
 - Entre eux
 - Avec l'environnement
 - Avec le résultat de ces interactions
- **L'émergence est le résultat de ces interactions :**
 - Le tout est plus que la somme des parties.
 - Tout est lié
- **Les émergences possèdent des caractéristiques tout à fait nouvelles vis-à-vis de celles des agents et des interactions qui les ont créés.**



2-1) Systèmes complexes et émergences (suite)



- **La simulation informatique du comportement des agents permet de faire des progrès considérables dans l'analyse et la prévision du phénomène d'émergence.**
- **La non linéarité des relations de causes à effets dans les systèmes complexes entraîne une extrême sensibilité de la forme des émergences aux **conditions initiales**, d'où l'imprévisibilité**

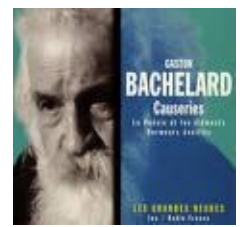
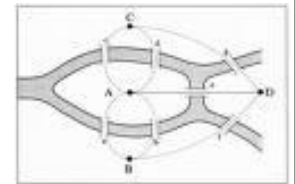
2-2) Objectifs des spécialistes de la complexité

- **Les objectifs visés par les spécialistes des sciences de la complexité peuvent être :**
 - **Découvrir des lois communes à l'ensemble des systèmes complexes par exemple systèmes biologiques et systèmes économiques**
 - **Expliquer et prévoir les comportements des systèmes complexes**
 - **Définir des moyens d'action pour faire évoluer un système complexe vers une cible définie, par exemple :**
 - **Protection d'une espèce dans un écosystème**
 - **Croissance d'une économie**
 - **Développer les conséquence philosophiques du changement de paradigme**

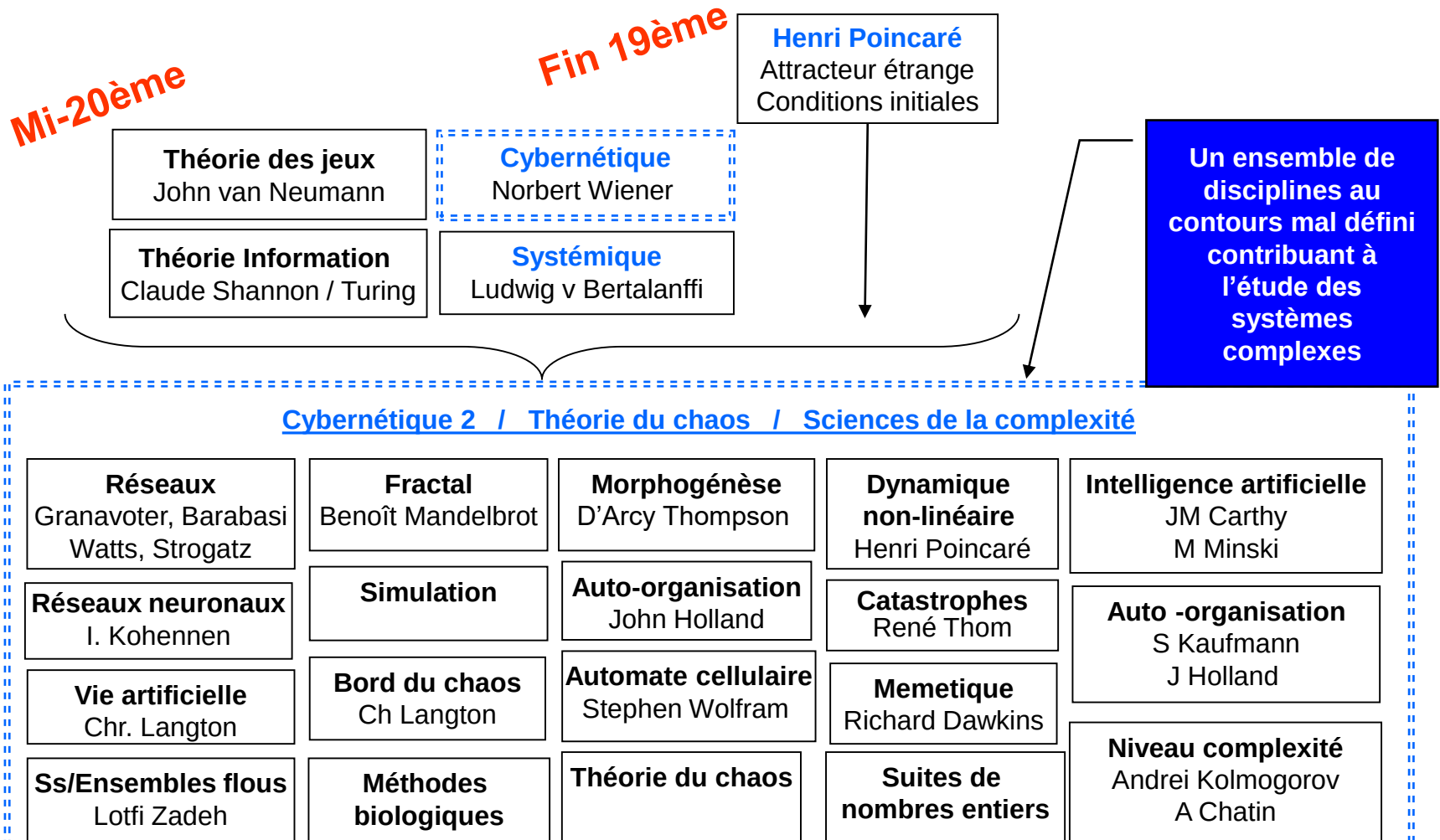
2-3) Historique de la complexité

- Ces disciplines ne sont pas apparues ex abrupto au début du 20^{ème} siècle : des scientifiques et philosophes avait eu l'intuition des systèmes complexes bien avant, par exemple...
 - **Léonard de Vinci** au 15^{ème} siècle avait perçu la notion d'interface entre systèmes :

« La surface est le nom de cette séparation que le corps de l'air forme avec les corps inclus en lui. Elle ne participe point du corps qui l'environne, non plus que de celui qu'elle entoure. Elle FORME le contact de ces corps entre eux. Cette surface a un nom, mais pas de substance »
 - **Leonhard Euler** dès le 18^{ème} siècle pour étudier le problème des 7 Ponts de Königsberg invente la théorie des graphes
 - **Henri Poincaré** en 1890 : en étudiant le problème des 3 corps avaient théorisés la notion de système chaotique déterministe
 - **Gaston Bachelard** dès les années 30 disait
« Qu'on mette alors une fois de plus en regard de cette épistémologie cartésienne l'idéal de complexité de la science contemporaine »



2-3) Historique de la complexité (suite)



2-3) Historique de la complexité (suite)

- Grâce aux ordinateurs personnels, cette approche s'est considérablement développée depuis 1985 : possibilité de simuler des systèmes relevant d'équations non solvables.
- Divers foyers dans le monde travaillent sur le même paradigme

Pays	Exemple de « pôle »	Dominantes
Belgique	Elia Prigogine	Flèche du temps Syst. dissipatifs
Chili	H Maturana et F Varela	Biologie (autopoiesis)
Chine	University of Tsinghua	
	University of Nankin	« Grey Sytems »
Etats-Unis	Santa FE Institute	Pluridisciplinarité
	Info Mesa	Biologie
France	Polytechnique – ISC	Informatique
	Edgar Morin, JL Le Moigne	Sociologie, modélisation
Grande Bretagne		
Inde		
Russie	S.M. Kolmogorov	Théorie des probabilités

2-4) Le paradigme des systèmes complexes

Qu'est-ce qu'un paradigme ?

- **Selon Wikipedia :**
 - **En grec paradigma signifie : « modèle » ou « exemple ».**
 - **Un paradigme est :**
 - **Une représentation du monde, une manière de voir les choses, un**
 - **Un modèle cohérent de vision du monde**
- **Un paradigme oriente la pensée et permet d'interpréter les résultats d'expérience et de mesure**

2-4-1) Définition du paradigme des systèmes complexes

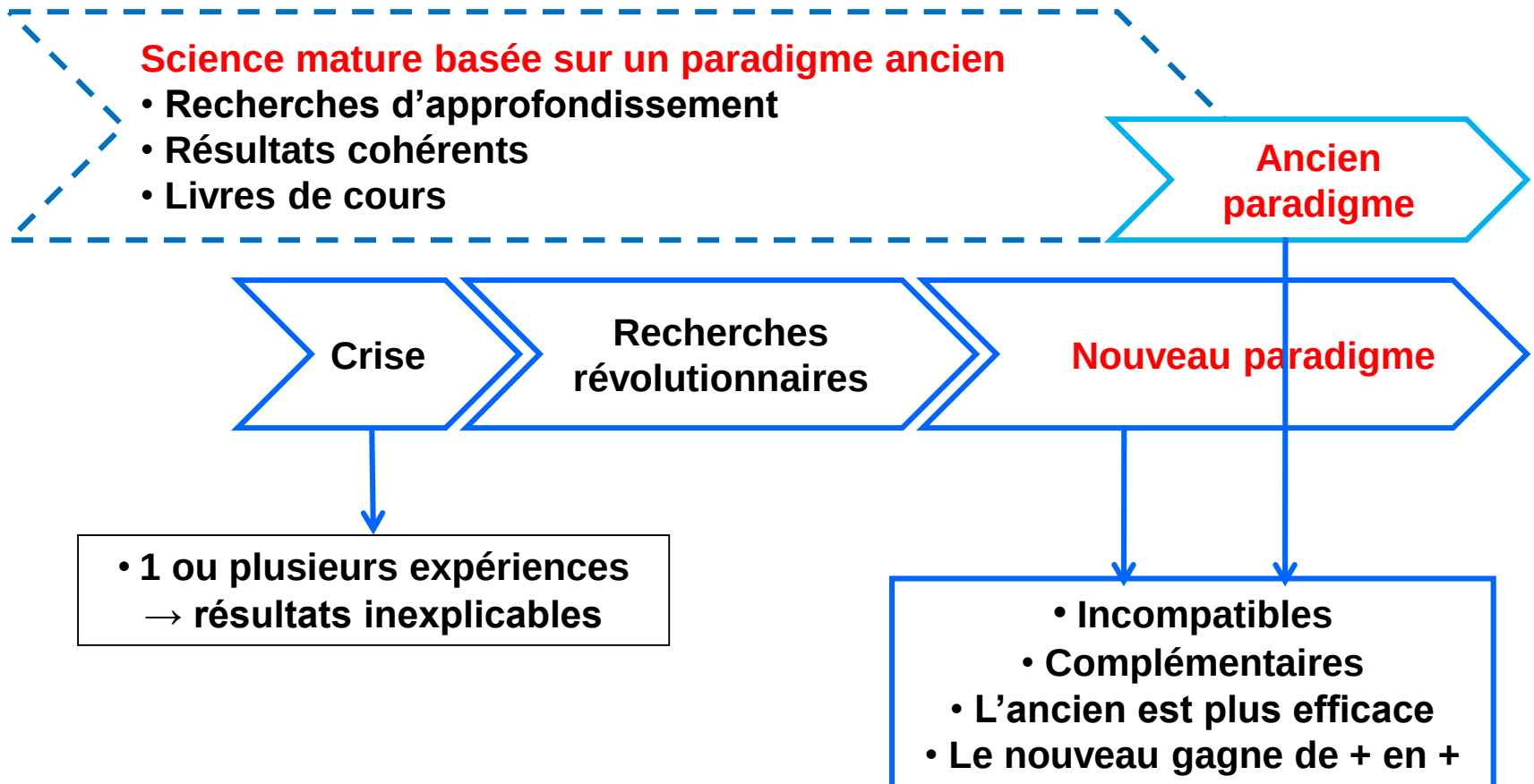
- Etudier le comportement d'un système complexe en :
 - **Considérant simultanément l'ensemble des interactions** des agents entre eux, avec leur environnement, avec les émergences produites par ces interactions
 - Tenant compte des **règles de comportement individuels** des agents qui peuvent varier en fonction du temps, du vécu des agents, de leur environnement.
- Par exemple étudier un système économique constitué d'individus et groupes de personnes en **considérant l'ensemble de leurs interactions et règles de comportement** qui relèvent de disciplines variées : psychologie, sociologie, économie...

Cette approche est très différentes des théories fondées sur les équilibres entre offre et demande
- Le paradigme des systèmes complexes est **pluridisciplinaire**.

2-4-2) Qu'apporte le nouveau paradigme de la complexité?

- **Palier l'incapacité des méthodes classiques à analyser, comprendre le fonctionnement des systèmes dits complexes qui sont omniprésents**
- **Prévoir leurs comportements**
- **Définir des interventions sur ces systèmes pour évolution dans un sens souhaité**

2-4-3) Les étapes d'un changement de paradigme



Selon Kuhn : 1962, in « The Structure of Scientific Revolution »

2-4-4) Changement de paradigme : vers les sciences de la complexité

Le paradigme de la complexité est radicalement différent de celui des sciences des siècles précédents basé sur le réductionnisme :

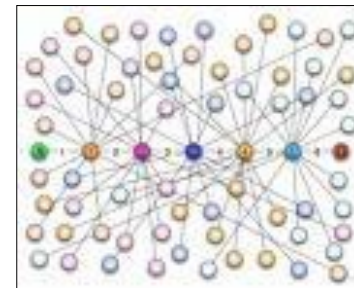
Approche antérieure (Réductionnisme) → Nouvelle approche (Complexité)

1. Fractionner les problèmes en autant de parties que nécessaire : réductionnisme

Etudier un système comme un tout non séable : holisme

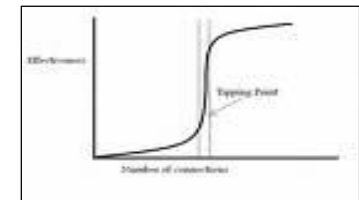
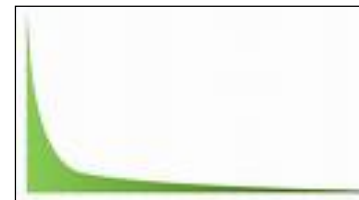
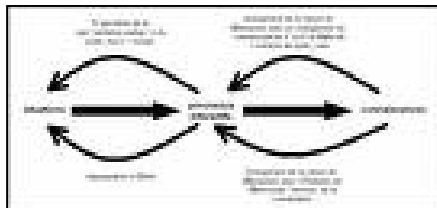
2. Dédire le comportement global du système de l'étude de chaque partie prise isolément

Considérer simultanément l'ensemble des relations des agents entre eux, avec l'environnement, avec le système



2-4-4) Changement de paradigme : vers les sciences de la complexité (suite)

Approche antérieure (Réductionnisme)	→ Nouvelle approche (Complexité)
3. Prévisibilité des évènements	Imprévisibilité des évènements Prévisibilité des types de comportement
4. Causalité en cascade : identification de l'impact des causes	Causalité en boucles multiples : incertitude sur l'impact des causes
5. Relations linéaires : progressivité	Relations non-linéaires : points de bascule, effet papillon
6. Lois statistiques en cloche dominantes	Lois de puissance dominantes



2-4-5) Faiblesses et force des mathématiques

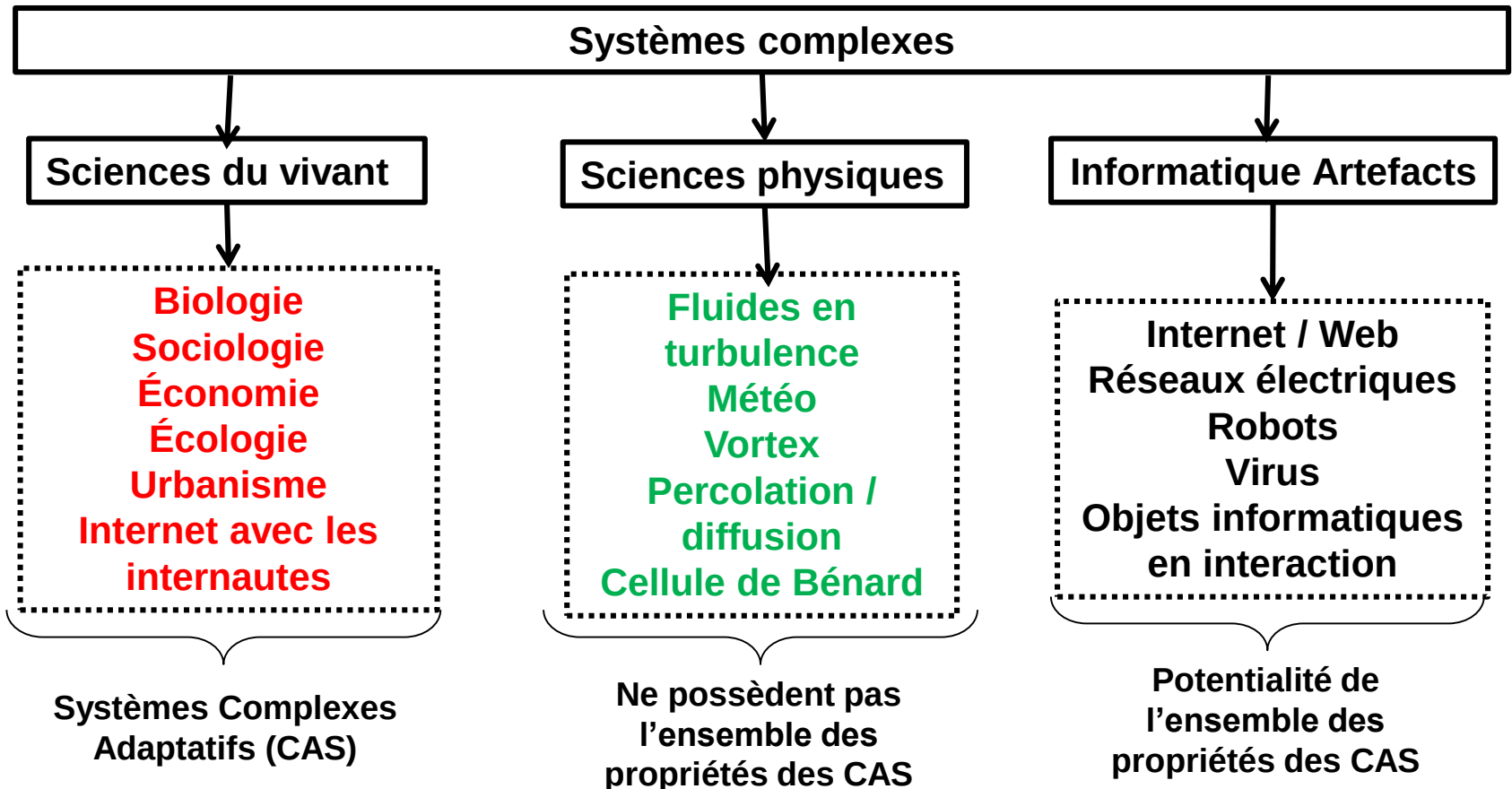
- **Mathématiques mal adaptées à l'étude de la majorité des systèmes complexes, notamment des systèmes complexes adaptatifs, à cause des difficultés de mise en équation :**
 - Variété des agents et de leurs règles de comportement
 - Evolution des règles de comportement des agents en fonction de leur vécu (historique des stimuli émis et reçus)
 - Non linéarité des règles de comportement
- **Mathématiques utiles dans les cas suivants :**
 - Règles de comportement des agent simples et non évolutives
 - Loi de probabilité avec très grand nombre d'agents
 - Exemple : les gaz (molécules = agent)
 - Equations possibles, pas forcément solubles, parce que très petit nombre d'agents
 - Exemple : Problème des 3 corps

2-4-6) Domaines enrichis par le nouveau paradigme

Domaines	Exemples d'applications	Auteur
Ecologie	Gaïa, chaînes alimentaires, écosystème	<i>J. Lovelock</i>
Robotique de groupe	Emergence des communications, comportements, langues	
Sciences sociales	Contagion, « small world », urbanisme, économie, marketing	<i>J. Miller, J. Epstein, S. Blackmore</i>
Ethologie, zoologie	Insectes sociaux, meutes	<i>E. Bonabeau</i>
Biologie, médecine	Contagion, émergence de la vie, des formes et des organes	<i>C. Dawkins, S. Kauffman</i>
Psychologie	Emergence de la conscience	<i>D. Hofstadter</i>
Géophysique	Incendies de forêts	

2-4-7) Contributions du paradigme de la complexité

- Très Importantes : palie l'impuissance des outils mathématiques et statistiques
- Faibles à importantes : outils mathématiques puissants



2-5) Evolution vers une complexité croissante

Cognitifs	C O G N I T I V I T E					Consommateurs
Peu cognitifs					Agents logiciels	
Faiblement cognitifs				Mammifères		
Règles variables			Fourmis			
Règles constantes		Electrons				
↑ Agents →		Identiques	Très semblables	Peu différents	Différents	Très différents
		Variabilité				
Durée des adaptations		10^{10} ans	10^3 ans	10^2 ans	$1/10^2$ ans	$1/10^3$

Difficulté croissante

2-6) Concepts les plus utilisés

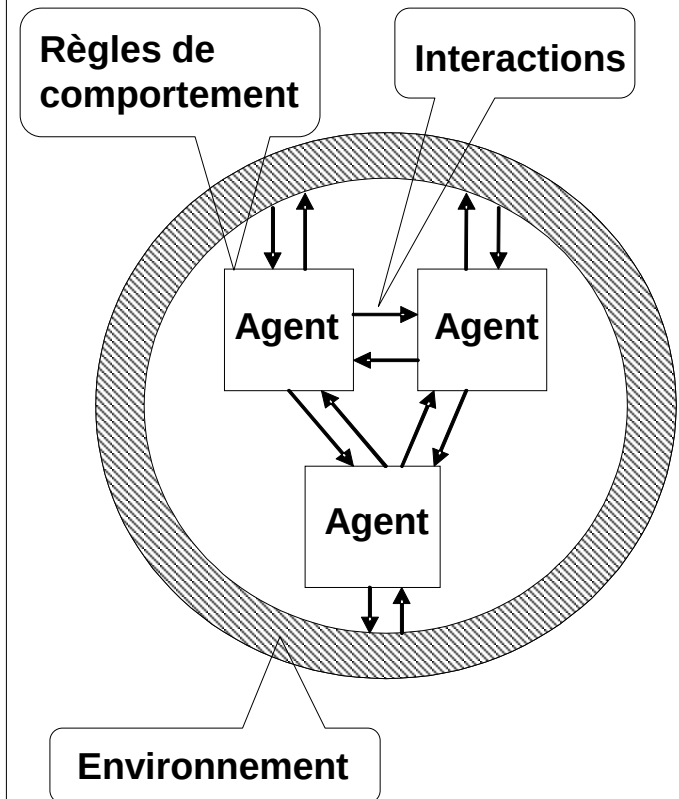
- **Emergence**
- **Auto-organisation**
- **Coévolution**
- **Feedback**
- **Géométrie fractal**
- **Loi de puissance**
- **Sensibilité aux conditions initiales**
- **Simulation**
- **Réseau**
- **Intelligence collective...**
 - ⇒ **Nous nous familiariserons progressivement avec eux durant cette séance**

3) Les systèmes complexes

- 1) Définition
- 2) Taxonomie
- 3) Systèmes complexes adaptatifs
- 4) Systèmes complexes des sciences physiques
- 5) Systèmes complexes de l'informatique
- 6) Quantification de la complexité

3-1) Définition

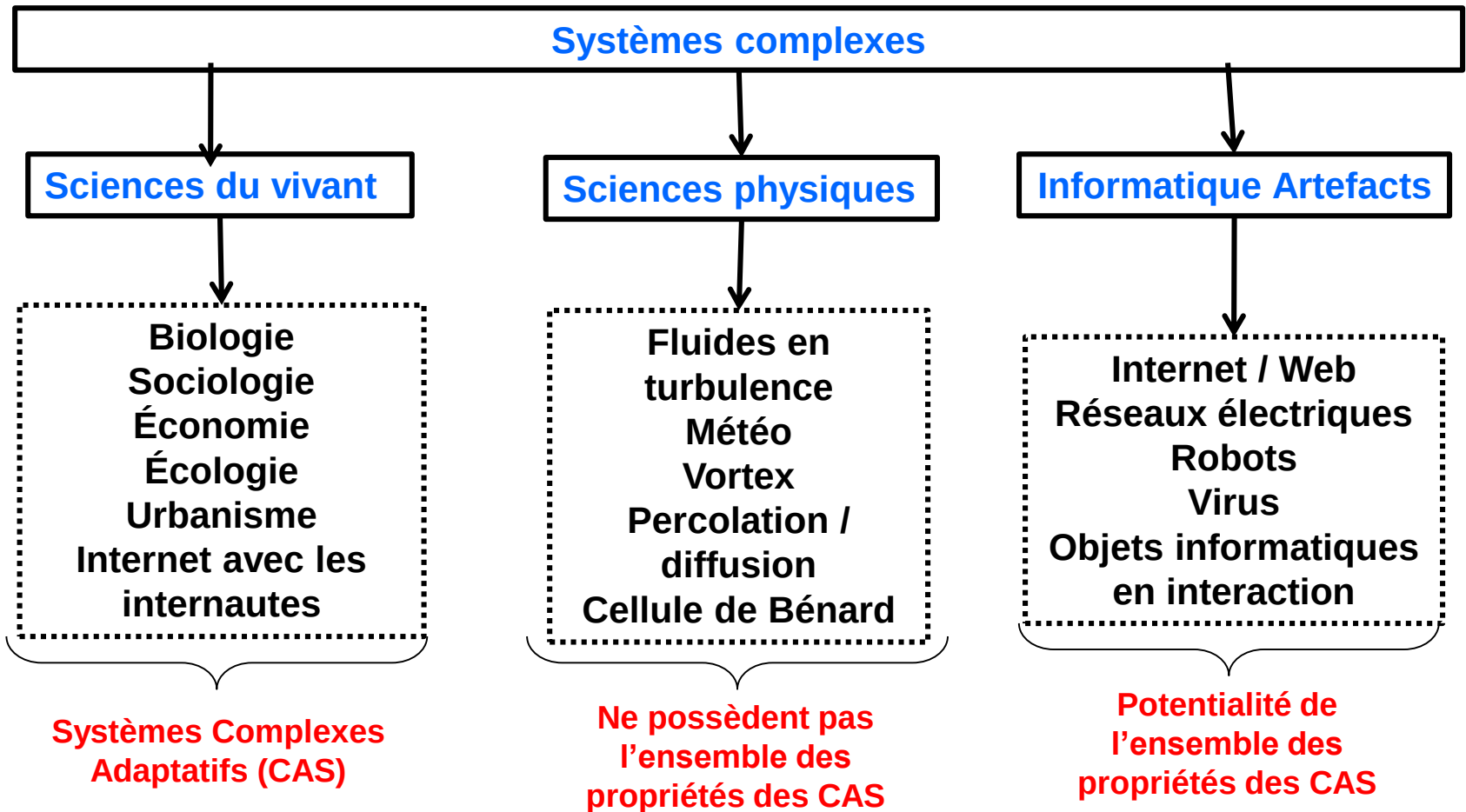
- **Les systèmes complexes sont constitués d'agents en interaction :**
 - Entre eux
 - Avec l'environnement
 - Avec le résultat de ces interactions
- **L'émergence est le résultat de ces interactions :**
 - Le tout est plus que la somme des parties.
 - Tout est lié
- **Les émergences possèdent des caractéristiques tout à fait nouvelles vis-à-vis de celles des agents et des interactions qui les ont créés.**



3-1) Définitions (suite)

- **Définitions encore floues :**
 - **Autre définition des systèmes complexes : systèmes dont on ne sait pas expliquer et prévoir le comportement au moyen des méthodes analytiques de l'intelligence humaine :**
 - **définition plus vaste que celles basées sur des interactions entre agents**
- **Les définitions des systèmes complexes sont :**
 - **relatives à leur perception par l'homme.**
 - **Certains systèmes considérés comme complexes ne le seraient plus si l'homme avait des capacités intellectuelles ou de traitement de l'information notablement plus élevées.**
 - **établies en fonction des problèmes à résoudre**
 - **liées au niveau de description auquel on se place**
- **Science jeunes : des nouveaux concepts rendront peut-être obsolète le corpus de nos connaissances actuelles des systèmes complexes**

3-2) Taxonomie des systèmes complexes



3-3) Systèmes complexes adaptatifs - CAS

- **CAS : Complex Adaptive Systems**
- **Appellation créée par le « Santa Fé Institute » pour la catégorie de systèmes complexes possédant l'ensemble des caractéristiques suivantes :**
 - **Leurs agents sont :**
 - **Évolutifs avec des capacités de mémorisation**
 - **Autonomes avec leurs propres règles de comportement face aux stimuli reçus**
 - **Contraints par les autres agents et leur environnement**
 - **En relations non linéaires entre eux et avec leur environnement**
 - **Multiplicité des réseaux d'interaction avec rétroactions positives et négatives (feedback)**
 - **Ouverture : flux d'énergie avec l'environnement**
- **Ces caractéristiques font qu'ils engendrent des émergences**
 - **auto organisation, adaptation, co-évolution**
 - **reproduction**
 - **organisation gigogne (sous systèmes dans les systèmes)**

3-3) Systèmes complexes adaptatifs - CAS (suite)

- **Les CAS comprennent des éléments vivants (humain, animaux, végétaux, biologiques)**
- **Présents partout**
 - **Insectes : fourmilière, ruche / Poissons, oiseaux : bancs, envolées**
 - **Espèces : écosystème...**
 - **Individus : foule (panique), bande (lynchage), marché (prix)...**
 - **Informatique : le web avec ses utilisateurs**
 - **Biologie : virus, neurones...**
 - **Économie : marchés...**
 - **Urbanisme : villes...**
- **L'informatique offre de fortes potentialités des propriétés des CAS : applications évolutives, robots...**

3-4) Systèmes complexes des sciences physiques

1) Systèmes cosmologiques

- **Système solaire**

2) Systèmes macroscopiques

- **Chimie**
 - **Minérale (petites molécules)**
 - **Organique (grosses molécules)**
- **Dynamique des fluides : météorologie, diffusion, percolation**
 - **(Imprévisibilité : effet papillon : petites causes grands effets)**
- **Cellules de Bénard : émergence surprenante d'une organisation**
- **Thermodynamique**
 - **systèmes fermés (Carnot)**
 - **systèmes ouverts dissipatifs (Ilya Prigogine)**
- **Réseaux de distribution d'électricité : phénomène de coupure de courant en cascade (point de basculement)**

3) Systèmes de particules élémentaires

- **Systèmes d'atomes (Bohr) et de molécules : leurs propriétés macroscopiques (température, pression, organisation...) sont une émergence des relations entre les particules élémentaires**

3-5) Systèmes complexes de l'informatique

- **Réseau de l'Internet sans les internautes :**
 - auto adaptation au volume du trafic des données
 - allocation dynamique des charges aux serveurs d'information
- **Robotique individuelle et collective**
- **Applications informatiques :**
 - simulation des systèmes complexes
 - auto apprentissage
 - vie artificielle
 - intelligence artificielle
- **Capacités d'adaptation importantes**
- **Fortes potentialités de l'ensemble propriétés des « CAS » ?**

3-6) Quantification de la complexité

- **Peut-on mesurer la complexité d'un système complexe ? Pas de méthode reconnue par tous**
- **Quelle complexité ?**
 - **Complexité de la définition : règles de comportement, conditions initiales**
 - **Complexité du comportement dynamique**
 - **La complexité est considérablement évolutive. Que faut-il alors mesurer ?**
 - **Complexité à un instant « t »**
 - **Complexité potentielle des systèmes évolutifs**
- **Une définition simple peut engendrer des comportements dynamiques très sophistiqués**
- **Norme de mesure de la complexité d'un objet proposée par Kolgomorov :**
 - **volume de la plus courte description (nombre lignes, de caractères)**
 - **la complexité d'un programme informatique n'est plus mesurée au moyen de son seul volume depuis plusieurs décennies.**