

3ème Année Spécialité Génie du Logiciel et des  
Systèmes d'Information (GLSI)

**Année universitaire 2014-2015**

# **Systèmes Complexes & Systèmes Multiagents**

30h (C : 22h30 – TD : 7h30)

Narjès BELLAMINE BEN SAOUD

Maitre de Conférences, ISI, Univ. Tunis El Manar

Chercheur, Lab. RIADI, ENSI, Univ. Manouba

# Vos définitions ?

- Système ?
- Complexe ?
- Multiagent ?

# Motivation

- « Comment **comprendre**, expliquer et gérer la complexité d'un système »

# Objectifs du cours

- Se familiariser avec des **exemples** importants de systèmes complexes à travers une variété de domaines
- Assimiler les **concepts clés** en systèmes complexes (e.g. l'émergence, l'auto-organisation, le contrôle distribué, etc.) et introduire à certains domaines théoriques qui sont concernés par la complexité
- Etudier des **outils** informatiques pour la **modélisation**, l'exploration et la construction de systèmes complexes
- Décrire, comprendre et **analyser** des problèmes complexes sous l'angle de la coexistence et la coopération entre plusieurs entités
- Utiliser certaines méthodes de développement couramment utilisées dans le cadre de la conception **d'agents** logiciels

# Plan du module (1/3)

## Chapitre 1 : Introduction à la théorie des systèmes complexes

- **Définition des concepts clés** : phénomène, système, complexité, complexe, compliqué, ...
- **Caractéristiques et propriétés des systèmes complexes** : Emergence, auto-organisation, décentralisation, décomposabilité fonctionnelle limitée, non-tractabilité, dynamique non linéaire, non déterminisme, ...
- **Exemples de systèmes complexes** (biologiques, sociaux, artificiels, ...)

## Chapitre 2 : Etude de systèmes complexes réels

- **Objectifs** : explication de systèmes réels, conception de systèmes artificiels, ...
- **Approches & multidisciplinarité** : apport par rapport au réductionnisme, Modélisation et Simulation (**M&S**) de systèmes complexes
- **Présentation d'une approche collaborative centrée sur la validation**

# Plan du module (2/3)

## **Chapitre 3 : Agents et Systèmes MultiAgents (SMA)**

- Des objets aux agents :
- Définitions et propriétés : Agent, SMA, Environnements
- Architectures d'agents
- Interactions et communication entre agents
- Organisation et SMA
- Méthodologie de développement de SMA : Voyelles, AGRE, GAIA, ...
- Environnement de développement de SMA : Jade, Madkit, ...
- Application : mise en œuvre d'un SMA avec Jade

## **Chapitre 4 : Modélisation et simulation à base d'agents**

- Modélisation : Définitions et techniques
- Théorie de la simulation
- Outils et environnements de simulation à base d'agents
- Exemples de mise en œuvre d'un simulateur à base d'agents

# Plan du module (3/3)

## **Chapitre 5 : Application d'autres techniques de M&S de systèmes complexes**

- Automates cellulaires
- Intelligence en essaim et insectes sociaux
- Réseaux et réseaux sociaux
- Réseaux de neurones

## **Chapitre 6 : Conception de systèmes complexes artificiels & autonomic computing**

- Définitions
- Challenges et Propriétés
- Approches
- Cas d'application

# Ressources / Références (livres, articles, sites web, etc.)

- Données à la fin de chaque cours
- Cependant, quelques ressources générales :
  - Jacques Ferber, les systèmes multi-agents, InterEditions, 1995
  - S. Russel, P. Norvic, «Intelligence Artificielle », 3<sup>ème</sup> Edition, 2010 (Chapitre 2: Agents Intelligents)
  - Cardon, A., 2004, Modéliser et concevoir une machine pensante, Approche de la conscience artificielle. Edition Vuibert.
  - Hervé P. Zwirn, Les Systèmes complexes, Odile Jacob.
  - Clergue, G.(1997), L'apprentissage de la complexité, Paris : Hermès.



- Santa Fe Institute: <http://www.santafe.edu/>



- New England Complex Systems Institute  
<http://www.necsi.org/>



- Site web (en Français) **Réseau national des systèmes complexes** <http://rncs.csregistry.org>
- Site web (en Anglais) **European Complex Systems Society** <http://ecss.csregistry.org>

# Qu'est-ce qu'un système complexe?

- De nombreuses personnes qualifient des systèmes comme étant complexes – mais que cela signifie-t-il?
- Définition:  
*“Un système complexe est un système pour lequel il est difficile, voire impossible, de réduire sa description à un nombre limité de paramètres ou de variables caractéristiques sans perdre ses propriétés fonctionnelles globales essentielles.”*
- Un système complexe est un système dont les propriétés ne sont pas complètement expliquées par la compréhension de ses composants.

# Qu'est-ce qu'un système complexe?

- Formellement, un système commence à avoir des comportements complexes (auto-organisation, émergence, etc.) lorsqu'il est composé de **parties interagissant** de manière **non-linéaire**.
- Un système complexe est un système :
  - Qui est composé d'unités interagissant (composants, éléments primitifs, etc.),
  - Où ces unités interagissent de manière non-linéaire,
  - Qui montre des propriétés émergentes c.à.d.. des propriétés résultant de l'interaction entre les unités et non des propriétés des unités elles-mêmes.

# Systèmes complexes versus systèmes compliqués (simples)

## Systèmes complexes:

- Temps (météo)
- Colonie de fourmis
- Famille
- Personne (physiologie)
- Ecosystème
- Un système planétaire

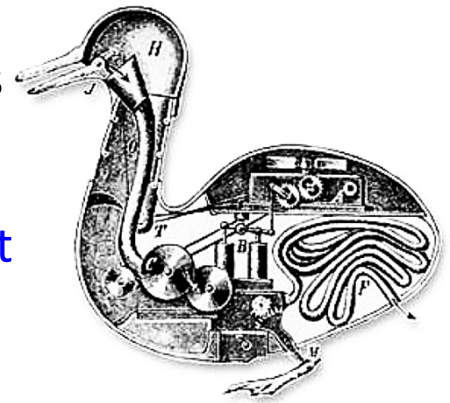
## Systèmes compliqués (Simples)

- Avion
- Thermomètre
- Une planète en orbite
- Une voiture

*La plupart des systèmes biologiques sont des systèmes complexes, alors que traditionnellement, les systèmes de fabrication humaine ne le sont pas*

# Réductionnisme versus une approche systèmes complexes

- Traditionnellement, les ingénieurs ont essayé de garder leurs systèmes **linéaires**, pour les rendre plus simple à expliquer, construire et prédire.
- Cependant, de nombreux systèmes biologiques et physiques qu'on veut comprendre, modéliser, construire ou prédire, sont des systèmes **non-linéaires**.
- Traditionnellement les systèmes complexes étaient souvent étudiés par une approche **réductionniste**.
- **Le réductionnisme** affirme que la nature complexe des choses peut toujours être réduite à (expliquée par) quelque chose de plus simple ou plus fondamentale.
- **Le réductionnisme dirait que quelque chose de complexe peut être expliqué comme une somme de ses composants**
- Le réductionnisme ne permet pas d'expliquer de manière adéquate les systèmes complexes.



# Complexité et multidisciplinarité

- **Les systèmes complexes**, et leur étude (la science de la complexité) est fortement **interdisciplinaire** :  
Des *outils* mathématiques, physiques, informatiques (vie artificielle,...) essaient de *résoudre des problèmes* dans des disciplines telles que les neurosciences, la météo, l'économie, la prédiction des séismes, la biologie moléculaire, qui comprennent des systèmes complexes.
- Les avancées de l'informatique ont facilité l'étude de ces systèmes
- Des méthodes de modélisation:
  - Des méthodes mathématiques en systèmes dynamiques (par exemple les équations différentielles, les équations aux différences, etc.)
  - Les systèmes à base d'agents

# D'autres exemples de systèmes complexes :

## Synchronisation - Lucioles

- **Le phénomène**
  - Un essaim de lucioles mâles **synchronisent** leur flashes
  - En partant de flashes dispersés **aléatoires**, des groupes synchronisés grandissent et s'assemblent
  - Signification:
    - Toujours pas claire...
    - Le comportement coopératif amplifie la visibilité pour attirer les femelles (partage du gain)?
    - Le comportement coopératif aide à se fondre dans la masse et à éviter les prédateurs (partage du risque)?
    - ... ou compétition pour être le premier à flasher?
  - exemple classique de synchronisation d'oscillateurs entretenus



Fireflies flashing in sync on the river banks of Malaysia

# Synchronisation - lucioles

- **Mécanisme**

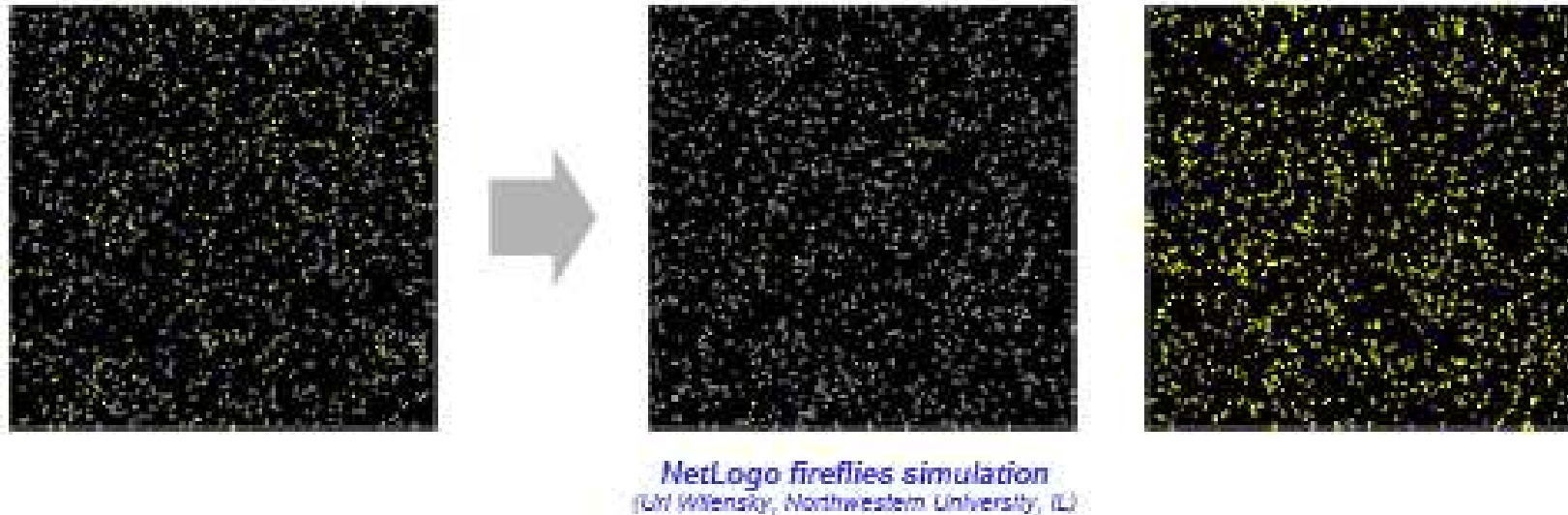
- Des cellules émettrices de lumière (photocytes) localisée dans l'abdomen
- 1. chaque luciole maintient un cycle de flashes interne régulier:
  - Mécanisme physiologique encore pas clair...
  - Un groupe de neurones régulant le rythme « pacemaker »?
  - Métabolisme oscillatoire autonome?
- 2. chaque luciole ajuste son cycle de flashes à celui de ses voisins:
  - Augmente/diminue la fréquence



*Say's firefly, in the US*  
(Arwin Provansha, Purdue Dept of Entomology, IN)



# Modèle informatique d'un système complexe: Synchronisation - lucioles



## Modélisation & simulation

- chaque « cellule » luciole :
  - vole au hasard
  - Flashe selon son horloge interne
  - adapte son horloge par rapport à ses voisins
- Un système distribué se coordonne sans leader

# Concepts appris par cet exemple

- Règles individuelles simples
- *Emergence* d'une synchronisation collective
- Pas de contrôle centralisé (pas de pacemaker central)
- Interactions locales (insecte  $\leftrightarrow$  insecte)
- Coopération

## Autres exemples de systèmes complexes : Mouvement de groupe – Embouteillage

### Le phénomène

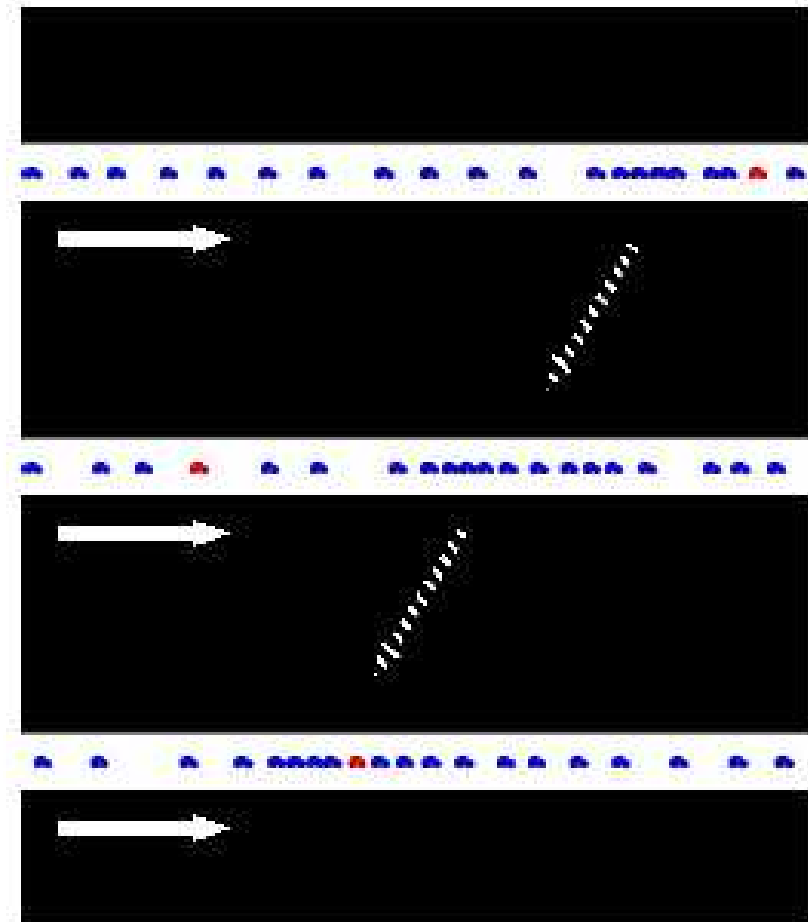
- Un flot de voitures se brise en groupes denses et espaces vides
- Aucun besoin d'une cause centrale (par exemple véhicule lent, feu tricolore, ou accident)



*Traffic jam*  
(Department of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign)

# Modèle du système complexe: Mouvement de groupe – Embouteillage

- **Modélisation & simulation**
  - chaque voiture:
    - Ralentit s'il y a une autre voiture proche devant-elle
    - Accélère s'il n'y a pas de voiture proche devant-elle
  - émergence d'un comportement de groupe qualitativement différent du comportement individuel



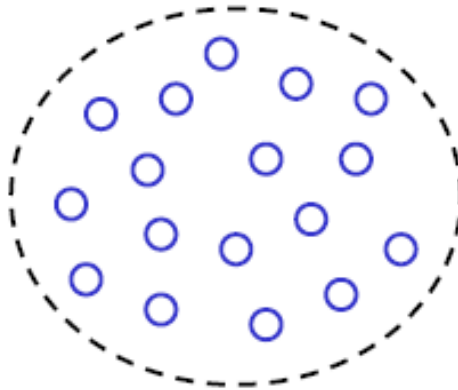
*NetLogo traffic basic simulation, after Mitchel Resnick  
(Uri Wilensky, Northwestern University, IL)*

# Caractéristiques élémentaires communes des systèmes complexes

# Caractéristiques élémentaires communes des systèmes complexes

## 1. Grand nombre d'éléments

– Exemple d'embouteillage (voitures),

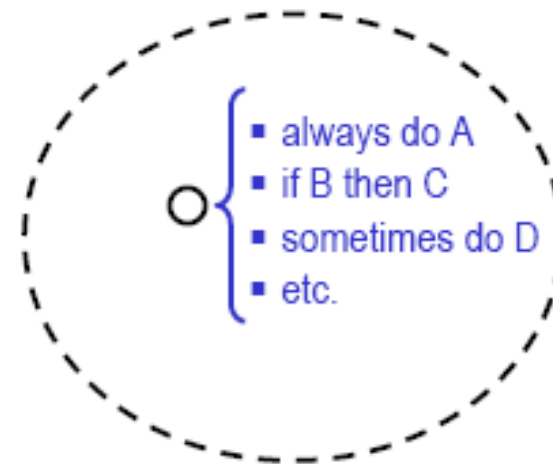


# Caractéristiques élémentaires communes des systèmes complexes

## 2. Règles de comportement simples

Exemple d'embouteillage (ajustement de la vitesse),  
synchronisation (changement de la fréquence)

- répertoire limité de comportement fixes et réactifs
- note: les éléments ne sont pas *intrinsèquement* simples, seulement fonctionnellement au niveau de la description du processus étudié

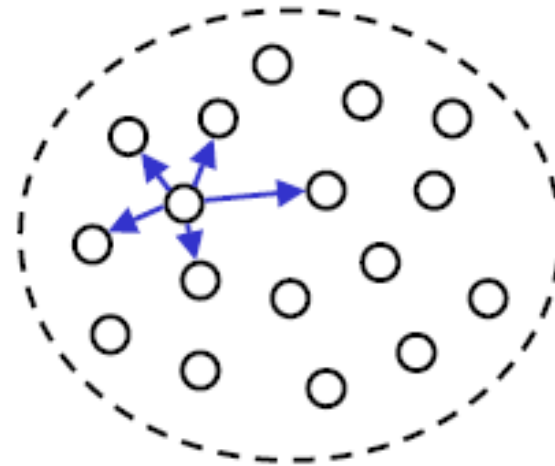


# Caractéristiques élémentaires communes des systèmes complexes

## 3. Interactions locales

Exemple d'embouteillage (prise en compte visuelle), synchronisation (stimulus lumineux)

- chaque élément interagit avec d'autres éléments et/ou l'environnement dans un voisinage local
- un-à-un ou messages diffusés



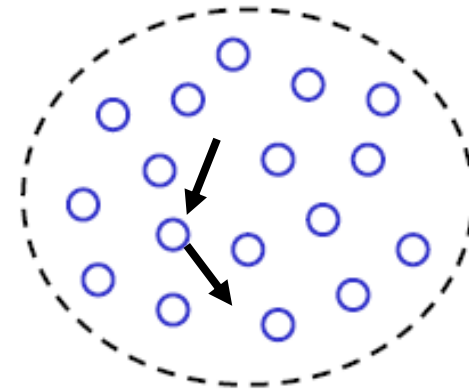


# Caractéristiques élémentaires communes des systèmes complexes

## 4. L'environnement (et ses effets)

Exemple d'embouteillage (routes, conditions de conduite), synchronisation (lumière du jour)

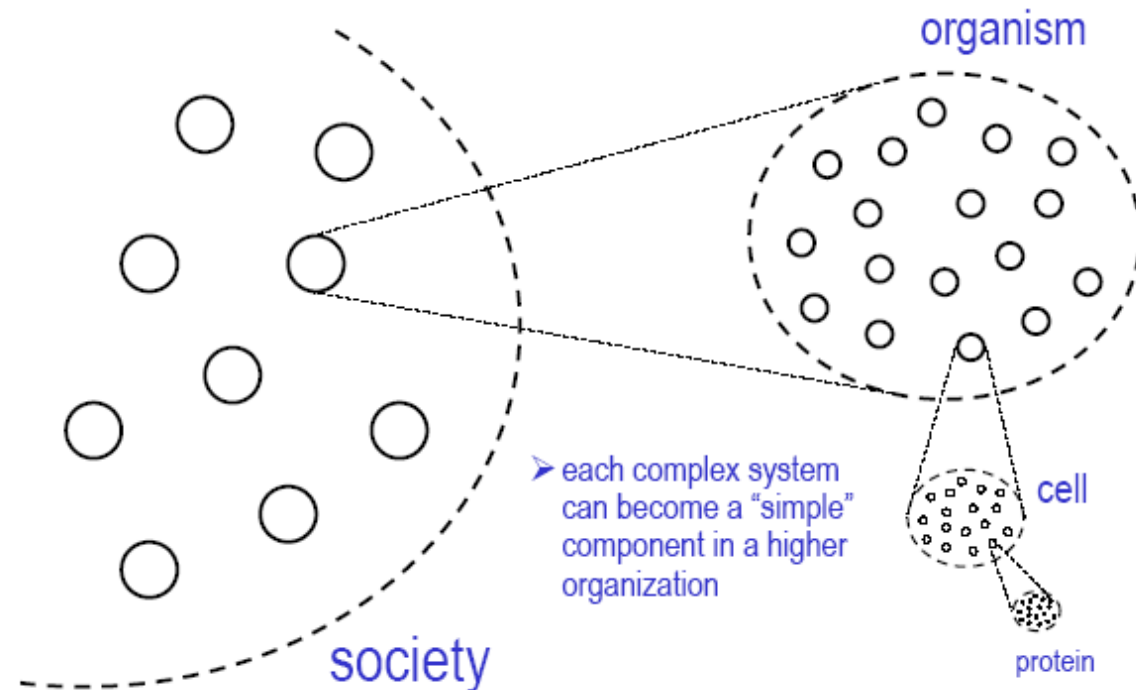
- L'environnement influence les éléments et les éléments ont à leur tour un effet sur l'environnement
- communication indirecte par le biais de l'environnement



# Caractéristiques élémentaires communes des systèmes complexes

## 5. Hiérarchie de niveaux

Les composants d'un système complexe peuvent eux-mêmes être des systèmes complexes. Par exemple, une économie est constituée d'organisations, qui sont constituées de personnes, qui sont constituées de cellules – (tous des systèmes complexes).



# Pourquoi les systèmes complexes sont-ils importants en informatique?

- Les avancées continues en technologie de l'information et des communications (ICT) permettent d'augmenter la **taille** et la **connectivité** des systèmes construits aujourd'hui.
- Gérer cette complexité est un challenge central pour l'industrie et le gouvernement : des softwares aux villes et aux marchés boursiers.
- Partout dans le monde, de nombreux groupes de chercheurs travaillent sur ce challenge. Dans de nombreux cas, ils s'inspirent de la biologie (qui apporte des exemples de systèmes qui arrivent à gérer la complexité). Des cellules aux écosystèmes, la biologie réussit des **changements d'échelle**, **l'adaptabilité**, **l'auto-réparation**, et la **robustesse**, souvent en exploitant des comportements "**émergents**" au niveau du système.
- C'est ce que nous voulons pour nos systèmes!

# Pourquoi les systèmes complexes sont-ils importants en informatique?

- Ils sont fondamentaux à la **théorie** et à **l'implémentation** des systèmes informatiques distribués, massivement parallèles
- Par exemple comment des millions d'agents informatiques (ou robotiques) indépendants peuvent coopérer pour exploiter des informations et réaliser des objectifs d'une manière qui soit :
  - Efficace, auto-optimisée, adaptive, robuste
- Ils sont nécessaires à la compréhension des concepts dans les **systèmes multi-agents**

# Complexité

-

## Propriétés des systèmes complexes

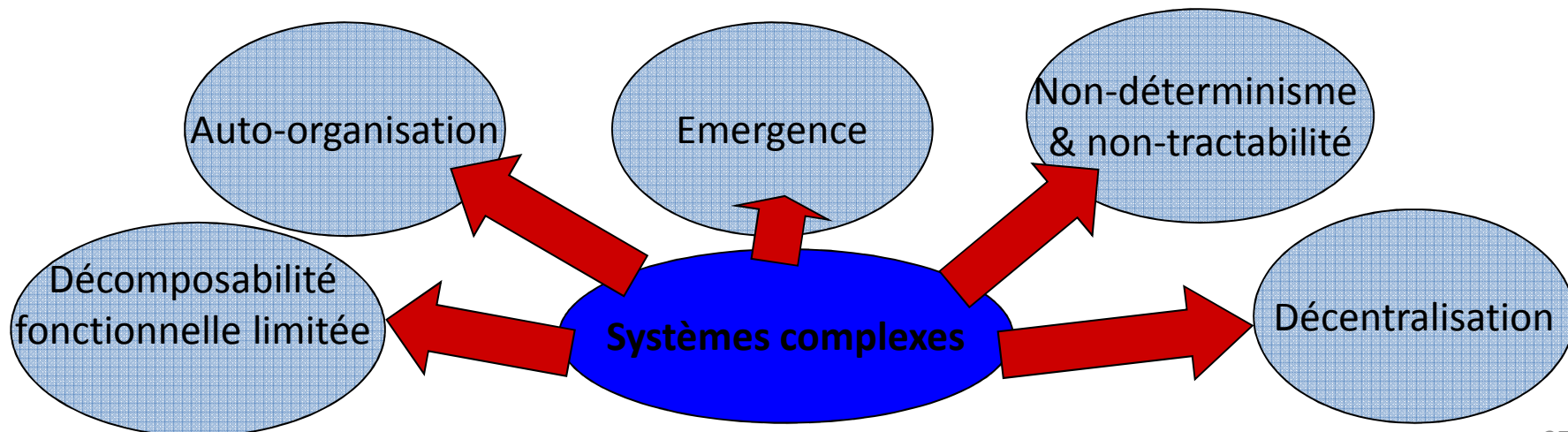
Basé sur le cours de  
**Julie Dugdale**, LIG, Grenoble

# Sommaire

- Remarques générales sur les propriétés des systèmes complexes
- Emergence
- Auto-organisation
- Décentralisation
- Décomposabilité fonctionnelle limitée
- Non-déterminisme et non-tractabilité

# Propriétés des systèmes complexes

- Plusieurs concepts-clé exprimant différents aspects des systèmes complexes.
- Ces concepts ont souvent **différentes définitions** dans les **différentes disciplines** liées aux systèmes complexes (pas d'accord global)
- Différentes disciplines donnent **différents poids** à chaque concept pour définir un système complexe



# 1. Emergence

- Probablement la propriété la plus importante des systèmes complexes
- L'émergence est :
  - Le processus qui résulte en de nouvelles structures cohérentes, motifs et propriétés dans un système complexe
- Des phénomènes émergents arrivent par la non-linéarité et le caractère distribué des interactions entre les éléments du système



Un monticule créé par une colonie de termites : un exemple classique d'émergence dans la nature.



# Emergence

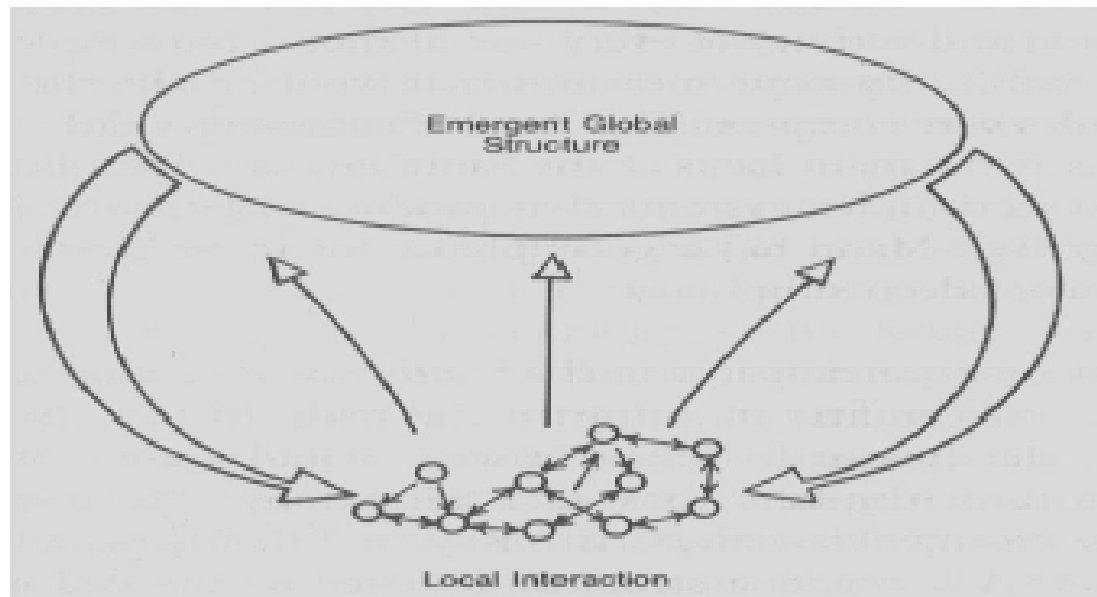
- Un des points principaux sur les phénomènes émergents est qu'ils sont observables un niveau **macroscopique**, alors qu'ils sont générés par des éléments de niveau **microscopique**.
- Le comportement ou les propriétés complexes ne sont pas des propriétés des entités elles-mêmes, et elles ne peuvent pas être prédites ou déduites du comportement des entités de bas-niveau: elles sont irréductibles
- Le système a des propriétés que les éléments n'ont pas.
- Exemples de phénomènes émergents: mouvement de foule (« ola »), marché de la bourse, les tâches d'un léopard, un embouteillage, intelligence humaine, la glace...



Ouragan Katrina: un phénomène météo émergent

# Emergence

- Les phénomènes émergents peuvent exercer un **feedback** sur les éléments, les influencer.
- Par exemple un embouteillage influence les conducteurs, le marché de la bourse influence les acheteurs



*Chris Langton's view of emergence in complex systems  
(from "Complexity", Roger Lewis, University of Chicago Press)*

# Emergence

- **Différentes** propriétés peuvent émerger des mêmes éléments/règles
  - Par exemple les mêmes molécules d'eau se combinant pour former un *liquide* ou des cristaux de *glace*
  - Pour un automate cellulaire, un état initial différent change le comportement, même avec les mêmes règles.
- Des **propriétés globales** peuvent constituer des **règles locales** à un niveau plus élevé
  - > traverser l'émergence de niveau en niveau

## Emergence de premier et de deuxième niveau (« first & second order emergence »)

- Emergence de premier et de deuxième ordre dans les organisations sociales humaines
- La différence est la **capacité de raisonner** :
  - Spécifiquement, *‘les personnes ont la capacité de reconnaître les institutions humaines, qui sont des formations émergentes, de raisonner et de réagir à leur sujet. Un comportement qui prend en compte de telles propriétés émergentes peut être qualifié d’émergence de second ordre’ (Gilbert)*

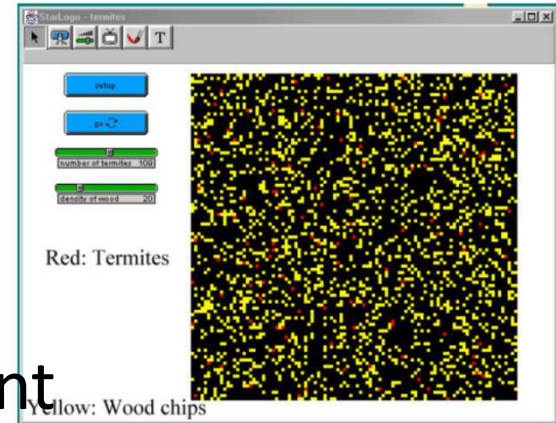
# Fonctionnalité émergente

- Fonctionnalité émergente (Luc Steels “Towards a theory of emergent functionality”)
- *« Un composant a une fonctionnalité particulière mais ceci n'est pas reconnaissable comme une sous-fonction de la fonctionnalité globale. Plutôt un composant implémente un comportement dont un effet secondaire contribue à la fonctionnalité globale [...] Chaque comportement a un effet secondaire et la somme de ces effets résulte en la fonctionnalité désirée”.*
- En d'autres mots, la fonctionnalité globale ou macroscopique d'un système à « fonctionnalité émergente » est la somme de tous les effets secondaires, c.a.d. de toutes les propriétés et fonctionnalités émergentes.

- Pourquoi l'émergence est si difficile à prédire ?

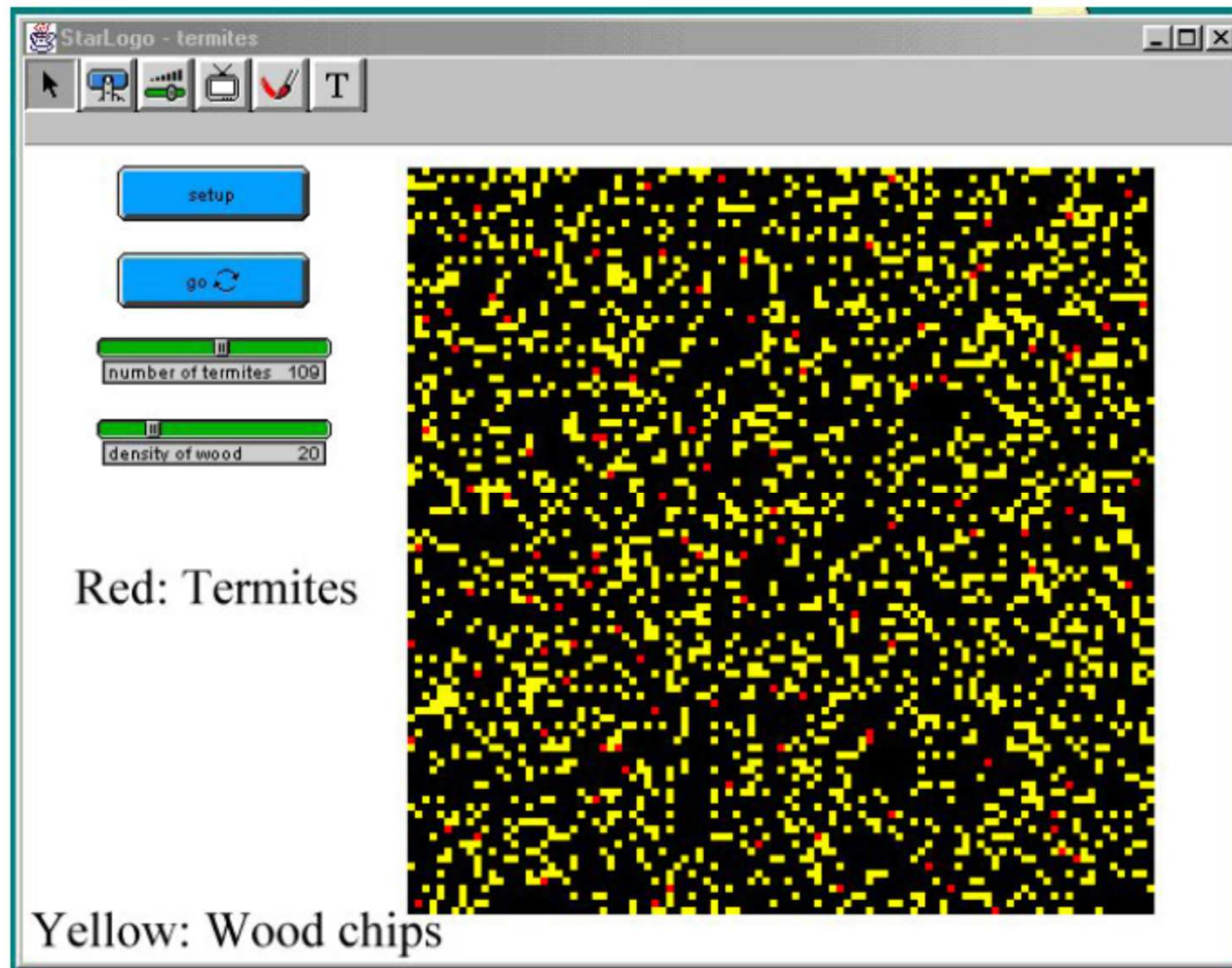
discussion..

# Un exemple de comportement émergent



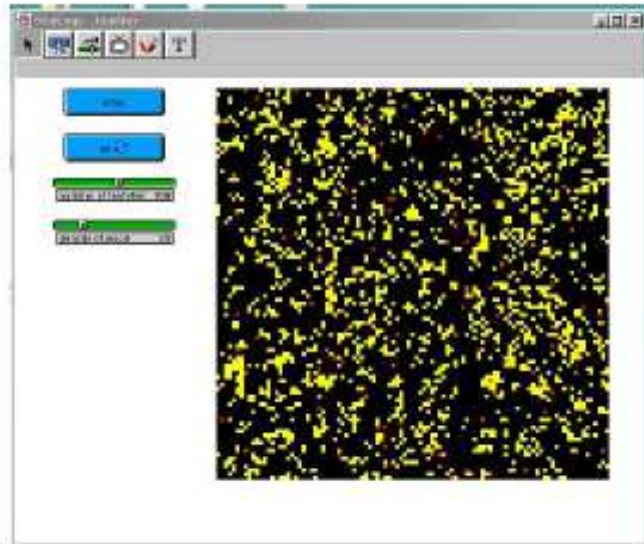
- Simulation informatique du comportement des termites
  - Couverture de bout de bois initiale aléatoire
  - Termites se déplacent aléatoirement, constamment
    - si rencontre un bout de bois alors
      - si transporte déjà un bout de bois alors
        - le laisse tomber
      - sinon
        - le ramasse
    - fin du si
  - fin du si
- Que va-t-il arriver finalement?

# Etat initial

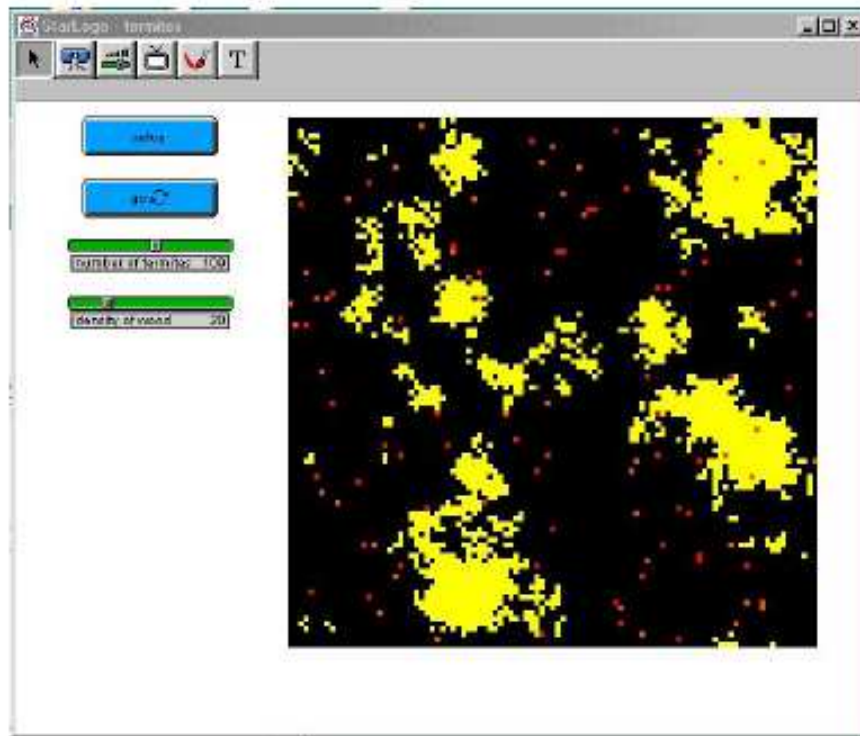




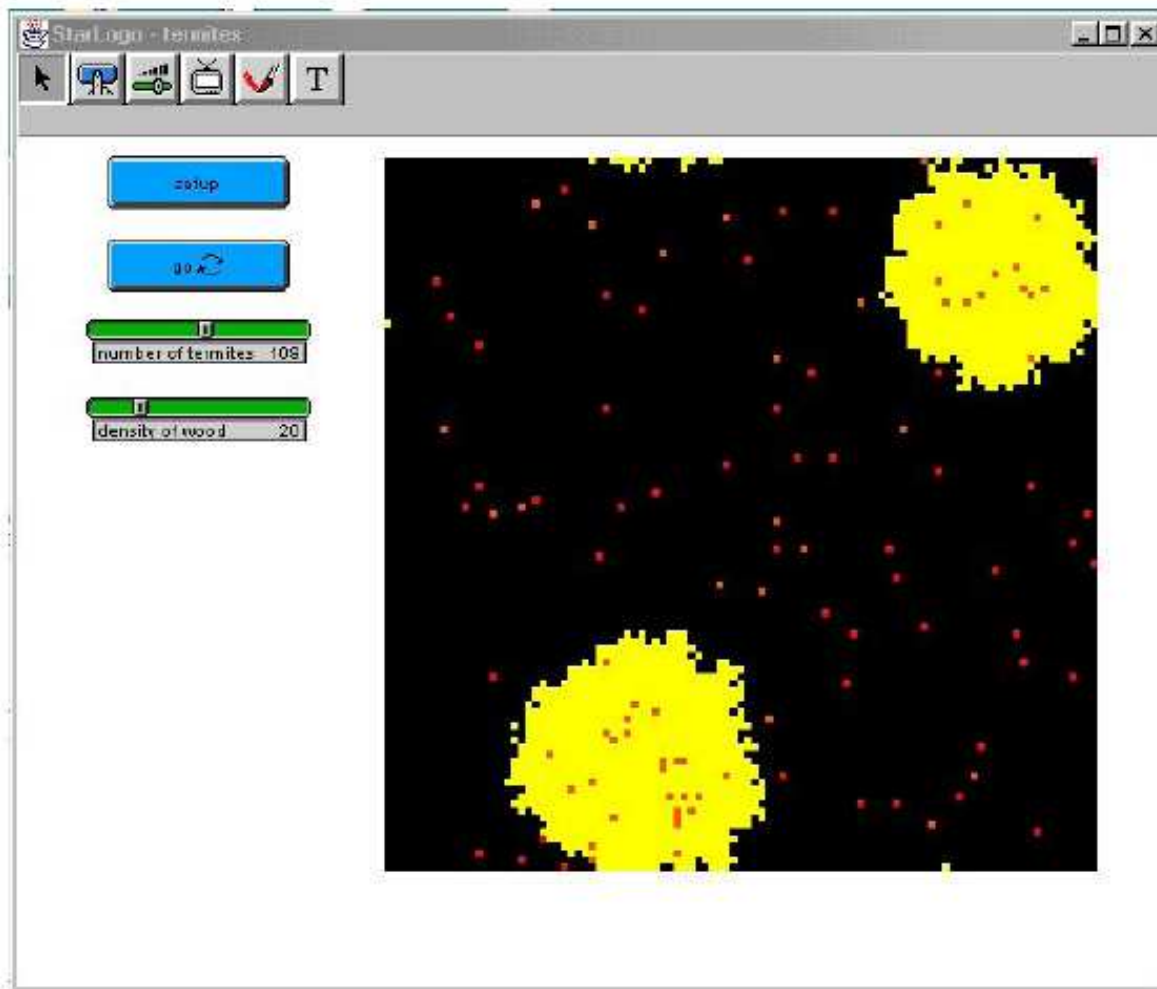
# Etapes suivantes...



# Plus tard...



# Encore plus tard...



Les termites ont **trié** les bouts de bois en tas

(**émergence de tas** de bois et **un comportement de tri émergent** pour les termites)

## 2. Auto-organisation

- D'abord remarquée dans le domaine de la physique.
- Définition: *Changements à l'ordre interne ou à l'organisation d'un système sans guidage ou management par aucune source extérieure*



Comportement de regroupement  
de grues de Sandhill

# Exemples

- Exemples: **sélection naturelle** (caractéristiques qui aident à la survie deviennent plus communes dans les espèces), '**evolutionary computation**', '**brain plasticity**', **réseaux de neurones**
- Les **réseaux ad-hoc** (improvisés) qui construisent leur structure de manière autonome, grâce à leurs composants qui détectent leurs présences entre eux.

# Organisation et Auto-organisation

- L'ordre peut être imposé à partir de **l'extérieur** du système
  - Pour comprendre, on a besoin de regarder la source externe d'organisation
- Dans l'auto-organisation, l'ordre *émerge* à partir de **l'intérieur** du système
  - On doit regarder les interactions à l'intérieur du système
- Dans les systèmes biologiques, l'ordre émergent a souvent un but adaptif
  - Par exemple, l'organisation efficace d'une colonie de fourmis
- Pouvons-nous apprendre quelque chose des systèmes biologiques pour développer des systèmes informatiques auto-organisés et adaptatifs!?

# Auto-organisation

- Auto-organisation par **interaction locale**:
  - **Directe**: élément  $\leftrightarrow$  élément
  - **Indirecte**: élément  $\leftrightarrow$  environnement  $\leftrightarrow$  élément  
(*'stigmergie'* chez les insectes sociaux)
- Souvent confondue avec l'émergence – MAIS il y a des cas d'auto-organisation sans émergence, et d'émergence sans auto-organisation...

# Auto-organisation et attracteurs

- Aussi défini comme : *un mouvement d'une grande région de l'espace d'état vers un espace persistant de petite taille, sous le contrôle du système lui-même.*
- Cette plus petite région de l'espace d'état est appelée un **attracteur**.
- **Qu'est-ce qu'un attracteur ?**
- Un état préféré pour le système, tel que si le système est démarré à partir d'un autre état, il évoluera jusqu'à ce qu'il arrive à l'attracteur, et y restera dans l'absence d'autres facteurs.



# Attracteurs

- Un attracteur peut être un point  
(par exemple le centre d'un bol contenant une balle),
- Un attracteur peut être une trajectoire régulière  
(par exemple l'orbite d'une planète),
- Un attracteur peut être une série complexe d'états  
(par exemple le métabolisme d'une cellule)
- Ou...une séquence infinie (appelée un attracteur étrange).
- Tous spécifient un **volume restreint** de **l'espace d'état** (une compression).
- Le plus grand volume de l'espace d'état qui mène vers un attracteur s'appelle son « **bassin d'attraction** »

# attracteurs

- Le ratio entre le volume du bassin et le volume de l'attracteur peut être utilisé comme mesure du *degré d'auto-organisation du système*.
- Ce Facteur d'auto-organisation (SOF pour Self-Organization Factor) va varier entre le maximum qui est la taille totale de l'espace d'état, et un minimum de 1

# attracteurs

- Un système complexe peut avoir plusieurs attracteurs qui peuvent être modifiés par les changements d'interconnexions du système.
- Etudier l'auto-organisation est équivalent à **étudier les attracteurs** du système, leur forme et leurs dynamiques.
- Les attracteurs dans les systèmes complexes varient en persistance, certains ont une *longue durée* et peuvent alors apparaître comme des 'objets' fixes, certains ont une durée *très courte* (attracteurs passagers), beaucoup sont *intermédiaires*

### 3. Décentralisation

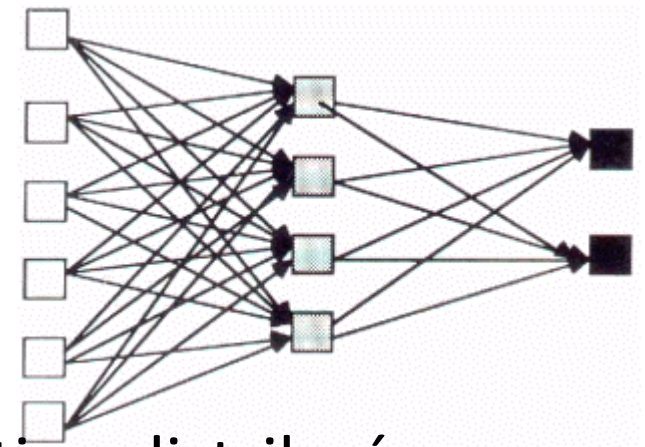
- décentralisation versus centralisation
- décentralisation: quand il n'y a pas de leader ou de manager qui dirige le système
  - La fourmi reine n'est **pas** le manager
  - Le premier oiseau dans un groupe volant en V n'est **pas** le leader
  - **Pas** de leader dans banc de poissons,
  - Les nids de fourmis n'ont **pas** de manager, etc.

# décentralisation

- L'ordre est toujours obtenu, mais sans leader central
- Les systèmes complexes incorporent habituellement un grand degré (souvent total) de décentralisation
- Cependant, ils peuvent contenir un mélange de control centralisé et décentralisé (exemple: systèmes sociaux)

# décentralisation

- Information décentralisée  
Chaque élément peut posséder de l'information,
- Connaissance décentralisée  
Les éléments n'ont pas de connaissance explicite ou d'intentions sur le groupe
- Action décentralisée  
Les éléments peuvent agir simultanément  
Tous les éléments ne se comportent pas de la même manière
- Exemple: réseaux de neurones, cognition distribuée (Hutchins), robotique Swarm, etc.



# décentralisation

- Bien que la décentralisation est de plus en plus commune dans les systèmes complexes
  - Les phénomènes décentralisés sont **toujours mal compris**
  - Il apparaît que nous avons une **préférence pour le contrôle centralisé** (dans les organisations, dans l'informatique)
  - Les idées de 'sans-leader', 'contrôle distribué', 'sans-designer' rencontrent toujours de la **résistance**

## 4. Décomposabilité fonctionnelle limitée

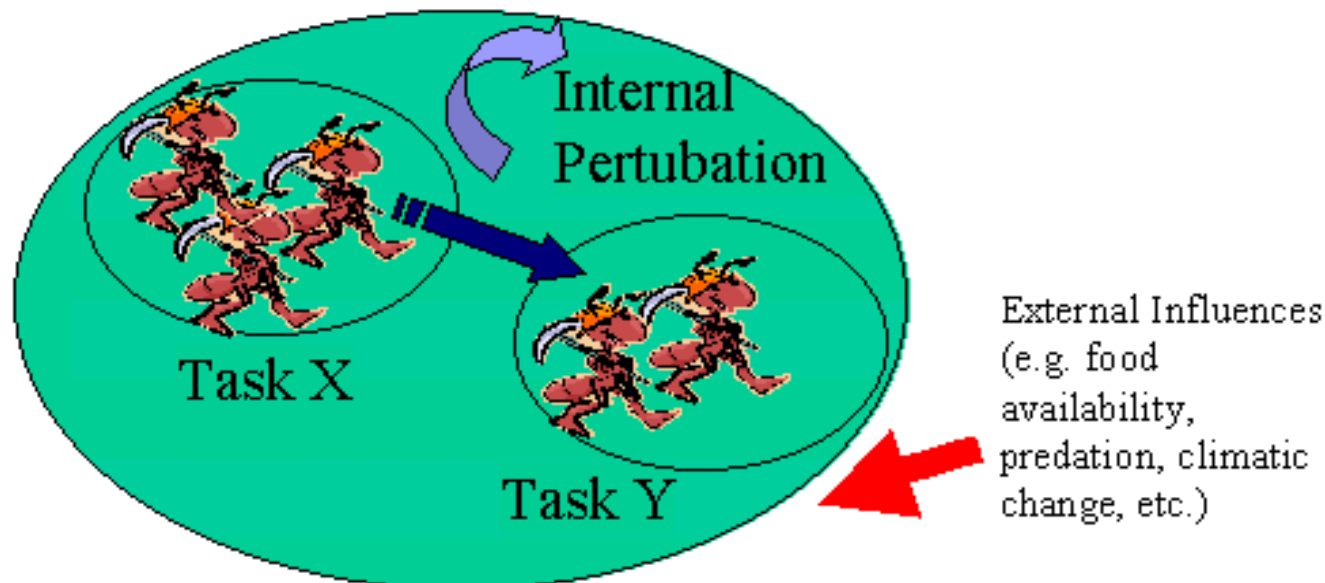
- Un système complexe a une structure dynamique.
- Il est donc difficile, sinon impossible, d'étudier leurs propriétés en les décomposant en parties fonctionnellement *stables*.
- Leur interaction permanente avec leur environnement et leur propriétés d'auto-organisation leur permet de se *restructurer fonctionnellement* eux-mêmes.



# Décomposabilité fonctionnelle limitée

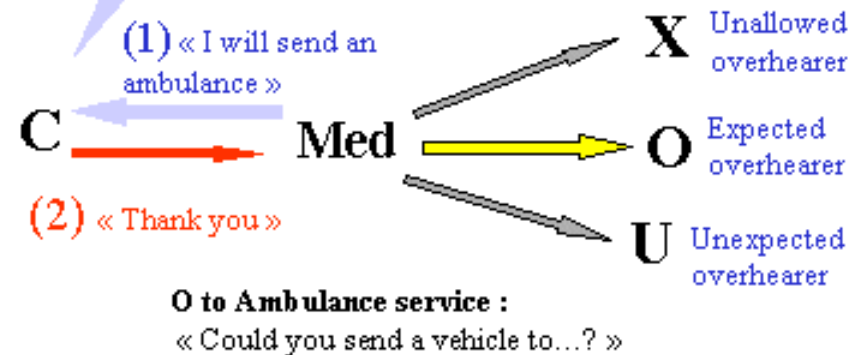
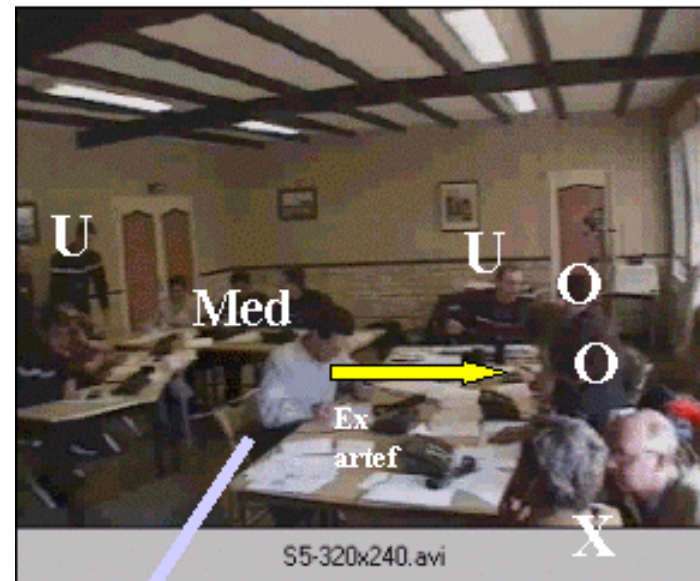
Exemple: *Plasticité dans la distribution du travail chez les insectes sociaux*

- Différentes activités sont souvent menées simultanément par des individus spécialisés, mais la distribution est rarement rigide.
- Les travailleurs échangent leurs tâches pour s'ajuster à des conditions changeantes (perturbation de colonie, disponibilité de nourriture, prédation, changement du climat).



## 5. Non-déterminisme et non-tractabilité

- Un système complexe est fondamentalement **non-déterministe**.
- Il est impossible d'anticiper précisément le comportement de tels systèmes même si nous connaissons complètement la fonction de ses constituants.
- Exemple cognitif: l'écoute flottante (« overheard »)



# Comment l'auto-organisation, l'émergence, etc. peuvent être étudiées?

- En utilisant des automates cellulaires et des réseaux booléens, vie artificielle, les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones.
- En général,
  - Commencer avec un ensemble de règles spécifiant le comportement des interconnexions,
  - Le réseau est alors initié aléatoirement et itéré (un pas) en suivant continuellement l'ensemble de règles.
  - Les motifs stables ainsi obtenus (s'il y en a) sont notés et la séquence répétée.
  - Après de nombreux essais, des généralisations à partir des résultats peuvent être tentées, avec une certaine probabilité statistique.

# En lire plus

- FAQ sur auto-organisation  
<http://www.calresco.org/sos/sosfaq.htm>
- SOC: « *How Nature Works: The Science of Self-Organised Criticality* ». Per Bak  
New York, NY: Copernicus Press  
1996
- Article du domaine de la robotique:  
*Designing Emergent Behaviors: From Local Interactions to Collective Intelligence*, Maja J. Mataric, From Animals to Animats 2; Meyer, J-A., et al (eds) (disponible on-line)

