

*TCD : Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes*

# Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

**C. Bertelle, A. Cardon, J. Colloc et D. Olivier**

LIH - Laboratoire d'Informatique du Havre

*DEA ITA - Informatique Théorique et Applications*

*Ecole Doctorale SPMI - Rouen/Le Havre*

0-0

C. Bertelle, A. Cardon, J. Colloc et D. Olivier - LIH

## **Introduction générale**

On traitera des systèmes complexes en abordant les deux parties énoncées dans le titre :

- La constitution de modèles :
  - Systèmes complexes ?
  - Quels concepts derrière la complexité des systèmes ?
  - Comment passer des concepts aux modèles ?
- L'aspect calculatoire :
  - Quel paradigme pour représenter ces systèmes par des approches calculables ?

- Comment construire et spécifier des entités informatiques appropriées ? ... dans des environnements distribués.
- Quel outils et technologies utiles aux environnements décentralisés qui sont à la base des implémentations auxquelles nous allons nous intéresser ?
- Applications :
  - Modèles pour les milieux naturels, écosystèmes, ...
  - Des modèles construit sur le paradigme du vivant

2- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

## **Plan général de déroulement du TCD**

### A Fondements

- 1 Introduction sur les systèmes complexes (2h)
- 2 Les agents et les systèmes multiagents (5h)

### B Implémentations

- 3 Les systèmes distribués et les agents mobiles (3h)
- 4 Les plateformes SMA (2h)

### C Applications

- 5 Intelligence en essaim et écosystèmes (3h)
- 6 Epigénèse et plasticité neuronale (3h)

3- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

## Bibliographie de base

- J. Ferber “*Les systèmes multi-agents*”, InterEditions, 1995.
- G. Weiss “*Multiagent Systems*”, MIT Press, 1999.
- A. Cardon “*Conscience artificielle et systèmes adaptatifs*”, Eyrolles, 2000.
- J. Geib, C. Gransart et P. Merle “*Corba, des concepts à la pratique*”, InterEditions, 1997.

4- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

- F. Blasco “*Tendances nouvelles en modélisation de l’environnement*”, Elsevier, 1997.
- E. Bonabeau et G. Theraulaz “*Intelligence collective*”, Hermès, 1994.
- E. Bonabeau, M. Dorigo et G. Theraulaz “*Swarm intelligence*”, Oxford University Press, 1999.

5- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

## **Méthodes de travail en DEA**

### **Formation par la recherche**

- Volume des cours réduit ...
- Présentations synthétiques dans les cours et beaucoup de pointeurs de références à travailler et à assimiler.
- Des mises en œuvre informatiques à effectuer de manière autonome.
- Rupture dans le système d'apprentissage ... formation *par la Recherche*.

6- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

## **Chapitre 1 - Introduction sur les systèmes complexes**

- 1.1 Théorie des systèmes
- 1.2 Des systèmes complexes : les écosystèmes
- 1.3 Exemples d'études et de simulations
- 1.4 Réalisations récentes dans l'équipe MIV-LIH (Modèles Informatiques du Vivant)

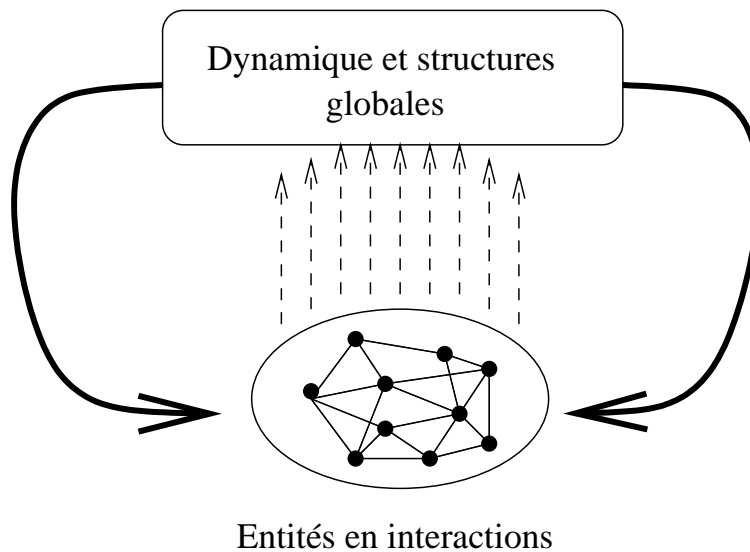
7- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

## Quelques références Web complémentaires

- Santa Fe Institute “2000 Complex Systems Summer School”
- Revue électronique “Complexity International”
- Ph. Preux “Réflexions sur les systèmes complexes ...”, Lab. Info du Littoral, Mémoire HDR (Habilitation à diriger des recherches), 1999
- P. Marcenac “Modélisation et simulation par agents : Application aux systèmes complexes”, Mémoire HDR, 1997
- ...

8- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

## 1.1 Théorie des systèmes



9- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

## Approche systémique

Un système - au sens de la systémique - est un ensemble constitutif et des propriétés le structurant en tant que tel.

- Ensemble constitutif d'entités en interactions mutuelles et en interaction avec un milieu extérieur ou environnement ;
- Propriétés caractéristiques conférant la structure de système :
  - dépendance interactive des éléments/entités du système, indissociable de leur dynamique (la modification d'une interaction ou d'un élément se répercute sur l'ensemble)

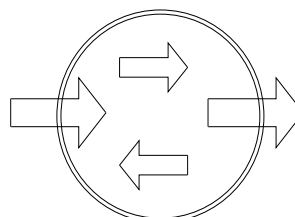
10- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

- existence ou émergence d'une organisation globale constitutive du système, identifiable et possédant une autonomie globale tout en étant en relation/dépendance avec son environnement. L'organisation émergente a des propriétés nouvelles par rapport aux entités dont elle est issue : *“le tout est plus que la somme des parties”*
- rétroaction de l'organisation globale sur ses parties constitutives : *“le tout est moins que la somme des parties” (E. Morin)*

11- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

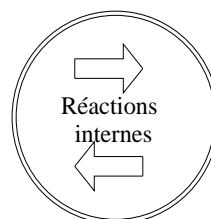
## Systemes fermés et systemes ouverts

**Systeme ouvert** : interagit avec environnement, transfere energie/matiere, permet formation d'organisations émergentes structurantes.



Systeme ouvert

**Systeme fermé** : coupe du monde exterieur, sans emergence dynamique.



Systeme fermé

12- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systemes complexes

## Systemes complexes

- Ajoute à la notion de systemes le caractere heterogene des constituants de nombreux systemes naturels (biologiques, économiques, ...)
- Dissociation entre "systeme complique" et "systeme complexe" (d'après J.L. Lemoigne) :
  - systeme complique : on peut le simplifier pour decouvrir son intelligibilite ;
  - systeme complexe : en le simplifiant, on detruit son intelligibilite que l'on ne peut decouvrir qu'en le modelisant dans sa totalite.

13- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systemes complexes

- Principe d'organisation en vue d'une fonction collective (survie, adaptation, reproduction) :
  - comportement téléologique, c'est à dire guidé par ses buts.
  - Le concept d'instrumentation d'un tel comportement est le "feed-back" informationel (issu de la notion de contrôle en cybernétique)

- Organisation hiérarchique de systèmes et sous-systèmes assurant sa stabilité.
- Stratégies de développement :
  - adaptatives : réorganisations structurales face à des fluctuations.
  - paradoxales : coexistence d'éléments contradictoires, complémentaires, concurrents ou antagonistes.(ces deux stratégies ne sont pas exclusives ...)



## **Evolution des systèmes complexes**

En général succession de périodes d'auto-organisation et de périodes de stress.

- auto-organisation : période sans perturbation majeure. Le système a tendance à se complexifier pour un perfectionnement fonctionnel et une amélioration de son pouvoir d'adaptation.
- stress : période de perturbation où le système se simplifie et se déstructure partiellement (ou totalement).

16- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

## **Systèmes complexes naturels**

- Ensemble d'entités naturelles, physiques ou non, en interaction et dont le comportement collectif influe sur la dynamique du système.
- Ecosystème traité dans la diversité naturelle de ses constituants physiques et de ses constituants organisationnels spatiaux ou temporels.

17- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

## **Des exemples de systèmes complexes “naturels”**

- Biologie : le comportement de chaque cellule d'un organisme va contribuer à définir son métabolisme global qui lui même contraint chaque cellule.
- Ecologie : les évolutions de la majorité des espèces sont dépendantes d'une organisation complexe d'autres espèces en interaction. De cette organisation, il se dégage des tendances globales d'évolution qui favorisent ou non le développement des espèces ou contraignent leur évolution.

18- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

- Economie : Chaque consommateur agit par son comportement social sur les marchés économiques qui lui imposent des contraintes.
- Transport : Le déplacement de véhicules est à l'origine d'un trafic global et de la formation d'organisations ou motifs (embouteillages, p.ex.) qui eux-mêmes contraignent le déplacement des véhicules.
- ...

19- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

## **Systemes complexes artificiels**

Approche décentralisée des modèles et des systèmes informatiques : ensemble d'entités formelles ou informatiques aux comportements + ou - autonomes et en communication/interaction/coopération.

- Entités formelles / Conception :
  - agents, systèmes multiagents, systèmes adaptatifs
  - auto-organisation, émergence

20- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

- Entités informatiques :
  - Middleware : plate-formes informatiques distribuées sur un bus de communication et basées sur le modèle client/serveur
  - Elévation du niveau d'abstraction des entités informatiques : objets, objets actifs, agents mobiles

21- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

## **1.2 Des systèmes complexes : les écosystèmes**

- Ecologie (définie par Haeckel, 1866) : science de l'habitat. D'abord études disjointes des espèces puis nécessité de prendre en compte les autres espèces et le milieu environnant avec lesquels chaque espèce interagit.
- Ecosystème (Tansley, 1935) : système d'interaction entre les populations de différentes espèces vivant dans un site et entre ces populations et le milieu physique.

22- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

### **Ecosystèmes - Propriétés caractéristiques**

- Structuration en une grande variété d'échelles d'espace-temps (d'une souche d'arbre en décomposition à l'organisation écologique planétaire).
- Flux d'énergie les traversant (rayonnement solaire, énergie de mise en mouvement de matière telle que l'eau ou l'air) permettant la mise en relation d'entités qui interagissent ... source du développement de structures organisées ;
- Interactions multiples et non réductibles.

23- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

### **Plusieurs étapes d'évolution des écosystèmes**

- état juvénile : croissances importantes mais instables ;
- état de maturité : stabilisation par complexification des espèces permettant l'adaptabilité et la mise en place de structures de survie ;
- état de vieillissement : prédominance de certaines espèces aux dépens des autres et contribuant à la simplification globale ;

24- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

- + des perturbations générant des stress et remettant en cause l'organisation en provoquant la disparition d'espèces et favorisant le développement rapide d'autres espèces ... rajeunissement.

25- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

### **1.3 Exemples d'études et de simulations**

- SimDelta (C. Cambier - LIP6)
- Rivage (D. Servat - IRD/LIP6)
- GEAMAS (P.Marcenec - La Réunion)
- Manta (A. Drogoul - LIP6)

### **SimDelta**

C. Cambier *Simdelta : un système multi-agents pour simuler la pêche sur le Delta Central du Niger*”, thèse de l'université Paris 6, 1994.

Laboratoire virtuel pour l'étude de la pêche. Il s'agit d'un système complexe hétérogène modélisé par un systèmes multi-agents.

- But : Synthétiser les connaissances de spécialistes en halieutique, écologie, anthropologie, ... sur l'étude du système de pêche du delta du Niger ;
- Simulation de la dynamique de population des poissons en prenant en compte des facteurs biologiques, topologiques

variés, le comportement et l'interaction des pêcheurs ;

- Trois types d'agents :
  - biotopes représentant des portions d'environnement. Ils sont interconnectés de manière dynamique (modifications lors des crues, par exemple) et possèdent des ressources nutritives variables pour les poissons.
  - poissons avec comportement réactifs. Ils peuvent avoir des comportements collectifs, comme des bancs qui sont eux-mêmes réifiés en agents capables d'adaptation. On intègre des connaissances précises des biologistes sur la reproduction, la croissance, la

mortalité et la migration de ces populations.

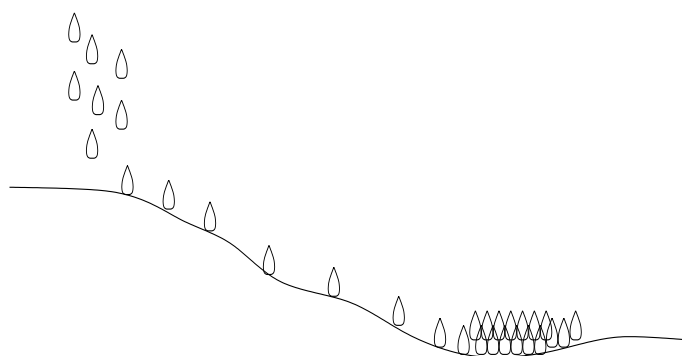
- pêcheurs avec comportement cognitifs. Ils contiennent une base de connaissance comprenant croyances, mémoire et règles de stratégies.
- Plusieurs simulations ont permis de faire des prévisions, dans le cas d'augmentation de l'effort de pêche, sur les modifications induites au niveau de la composition et de la taille des poissons.

## **Rivage - thèse D. Servat (27/11/2000)**

Modèle décrivant les processus physiques de ruissellement et d'infiltration d'eau pouvant conduire éventuellement à la formation de mares, de ravines ou chemins d'eau.

On simule le comportement d'agents "boules d'eau" qui sont créés par des pluies. Ils se déplacent par pesanteur sur un terrain dont on connaît la topographie, puis s'agrègent éventuellement.

30- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes



On utilise un découpage du domaine par triangulation de Delaunay conduisant à définir des agents médiateurs qui se chargent de restructurer le domaine par aggrégation ou séparation.

31- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes



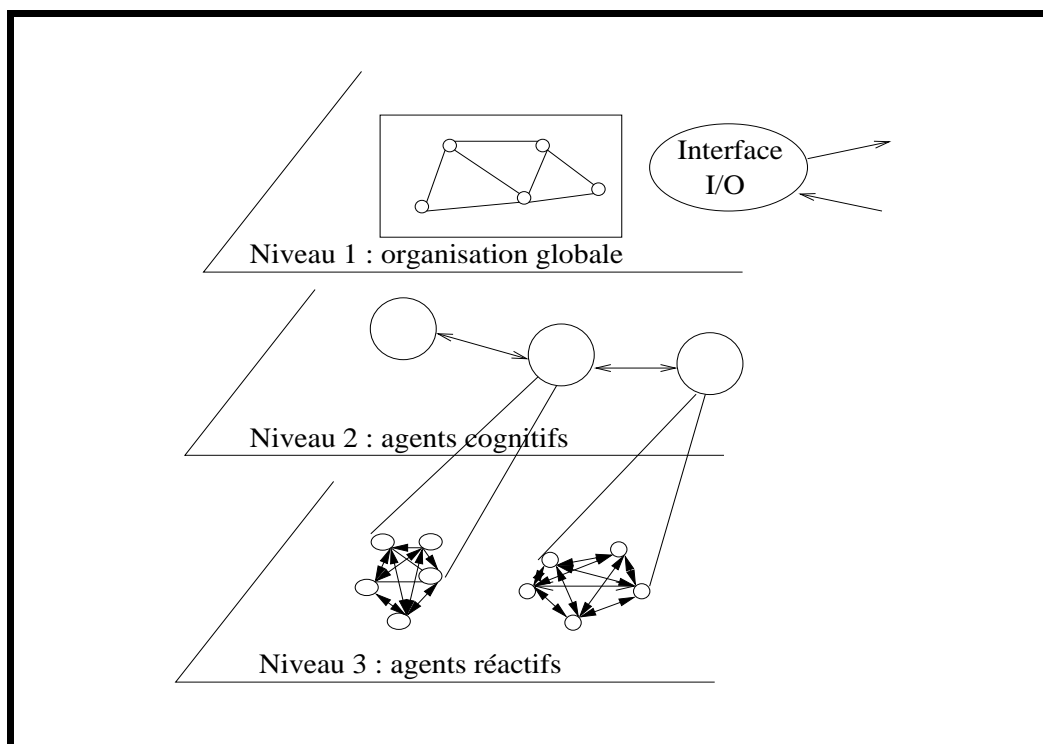
Des agents sols permettent de gérer les phénomènes d'infiltration de l'eau ainsi que des phénomènes d'érosion par des pluies : des agents "boules de terre" peuvent ainsi être arrachés et projetés. On modifie ainsi dynamiquement l'environnement et la topographie sur laquelle se base la simulation.

- David Servat "*Distribution du contrôle de l'action et de l'espace dans les simulations multi-agents*", JFIADSMA'00, Hermès.

## Geamas

P. Marcenac "*Modélisation de systèmes complexes par agents*", TSI, 16(8) : 1013-1037, 1997 (téléchargeable sur son site).

- **GE**neric Architecture for **MU**lti**A**gent **S**imulation : architecture de développement de simulation de systèmes complexes pour la compréhension de l'émergence des comportements.
- Modélisation à plusieurs niveaux de granularité : phénomène émergent vu comme une conséquence d'interactions entre composants d'un niveau inférieur. SMA hybride (réactif/cognitif) sur 3 niveaux.



34- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

- Récursivité du modèle : interaction et plongement des différents niveaux les uns dans les autres.
- Interactions inter-niveaux : décomposition/recomposition
- Application : Etude d'un système complexe de type auto-organisés (au sens de P. Bak "*Quand la nature s'organise*", Flammarion, 1999) décrivant le comportement du Piton de la Fournaise (île de la Réunion).

35- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

## Manta

Plateforme qui simule des organisations sociales de fourmis :  
A. Drogoul “*De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes*”, thèse de l’université Paris 6, 1993. A télécharger sur sa page personnelle du LIP6 ([www.lip6.fr](http://www.lip6.fr)) groupe OASIS.

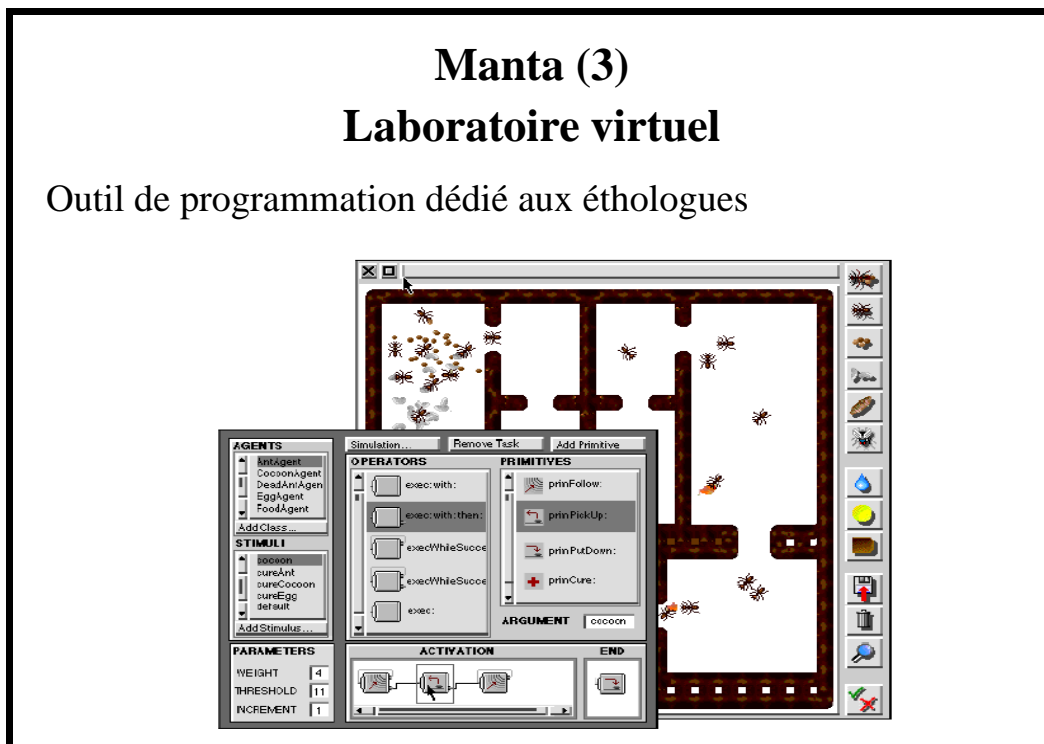
36- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

## Manta (2)

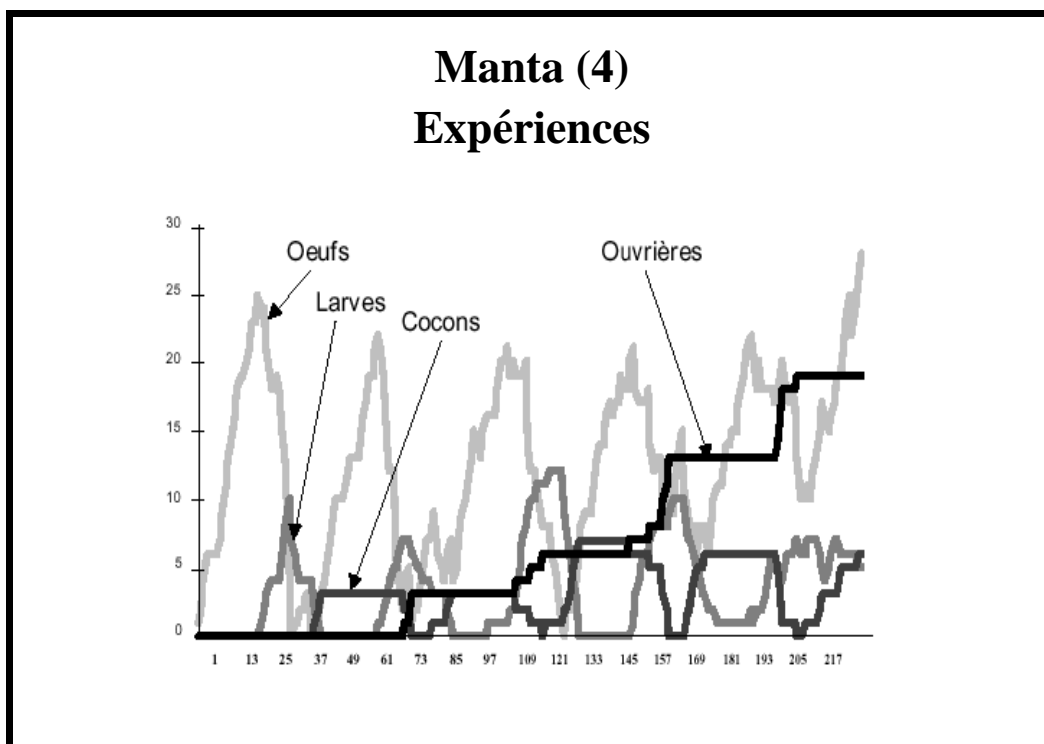
- Modélisation comportementale de fourmis *Ectatomma ruidum* Roger pour l’étude de l’émergence de structures sociales au sein d’une colonie ;
- Application de l’EthoModeling Framework.



37- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes



38- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes



39- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

- Dynamique démographique, organisation sociale évolutive (cas d'études : plusieurs reines, restriction de nourriture, ...)
- Division du travail : stigmergie/feed-back positif, constitution de castes comportementales ;
- Hiérarchie sociale (reine/dominantes/ouvrières).

## **Manta (5)**

### **Conclusion (A. Drogoul)**

- Capacité démontrée à
  - Simuler des phénomènes collectifs émergeant de l'interaction entre individus ;
  - Proposer des modèles de comportements, des hypothèses vérifiables dans la réalité ;
  - Interroger la biologie sur ses interprétations.
- La simulation multi-agent est ici un outil essentiel pour la construction de modèles explicatifs de phénomènes complexes.

## 1.4 Réalisations récentes dans l'équipe MIV-LIH

MIV - Modèles Informatiques du Vivant

- Modélisation et simulations dans le cadre d'environnements informatiques distribués.
- Modèles pour le vivant (bio-info, écosystèmes, ...)
- Modélisation inspirées du vivant (vie et conscience artificielle, routage dynamique, ...)

Présentation de réalisations basées sur des modèles de systèmes complexes naturels ou artificiels.

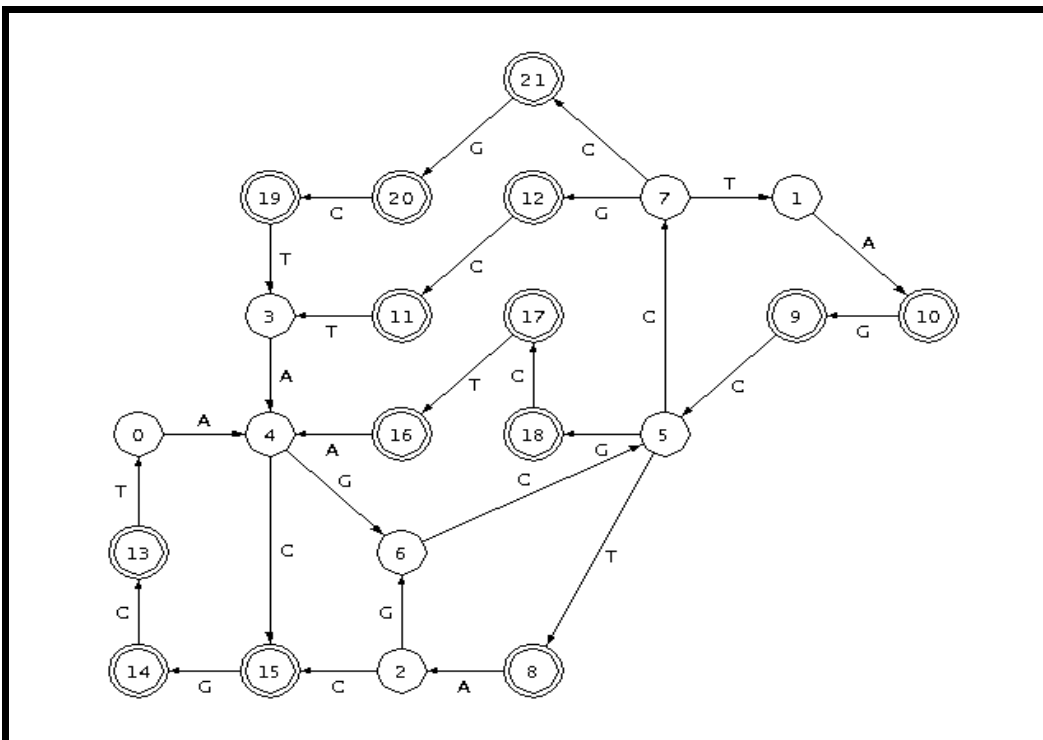
## DiMAntS

Distributed Multi-castes Ants System

- Séquençage de l'ADN par Hybridation (SBH process) → F. Guinand
- On recherche la séquence de base (nucleotides) d'un morceau d'ADN. On récupère un spectre contenant des erreurs :
  - erreur positive : dans le spectre mais pas dans la séquence
  - erreur négative : pas dans le spectre mais dans la séquence

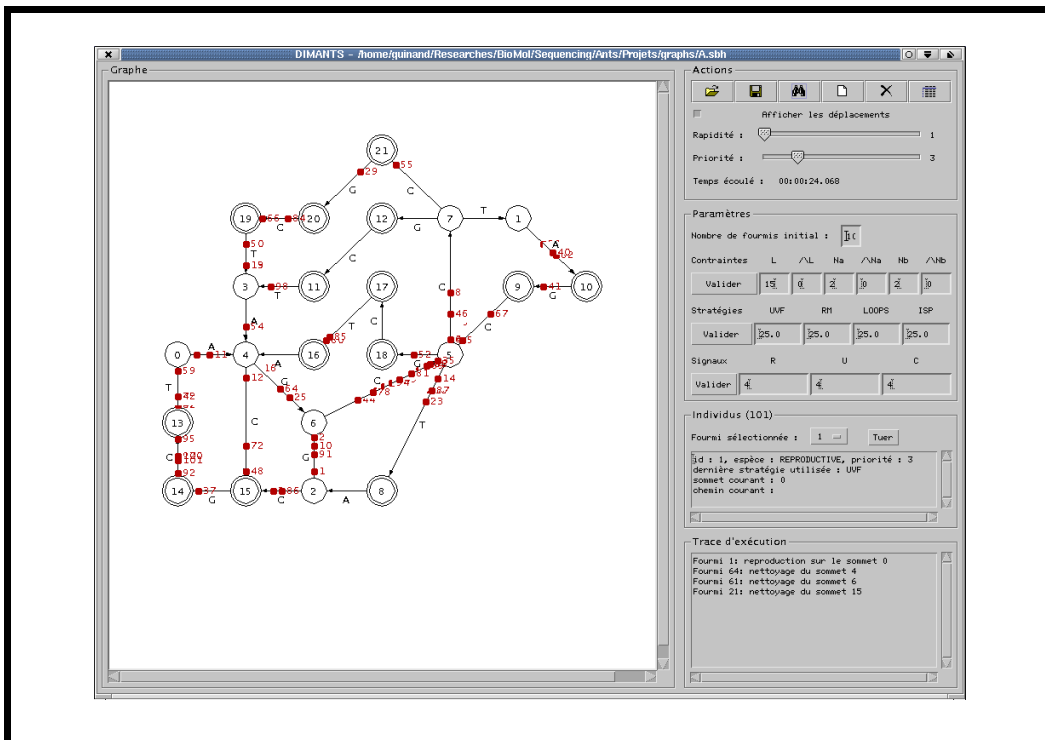
- erreur de répétition : plusieurs fois dans la séquence, une seule fois dans le spectre
- On en déduit un modèle → graphe orienté :
  - les sommets sont les nucléotides de l'ADN ou du spectre. Les erreurs négatives potentielles sont en double cercle.
  - les arcs matérialisent la séquentialisation

44- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes



45- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

- Il faut explorer tous les chemins du graphe satisfaisant à des contraintes : longueurs extrêmes, nombre maxi d'erreurs négatives et positives.
- On utilise une résolution distribuée modélisée par des castes de fourmis artificielles : des explorateurs et des nettoyeurs (compressant les chemins en identifiant des boucles).





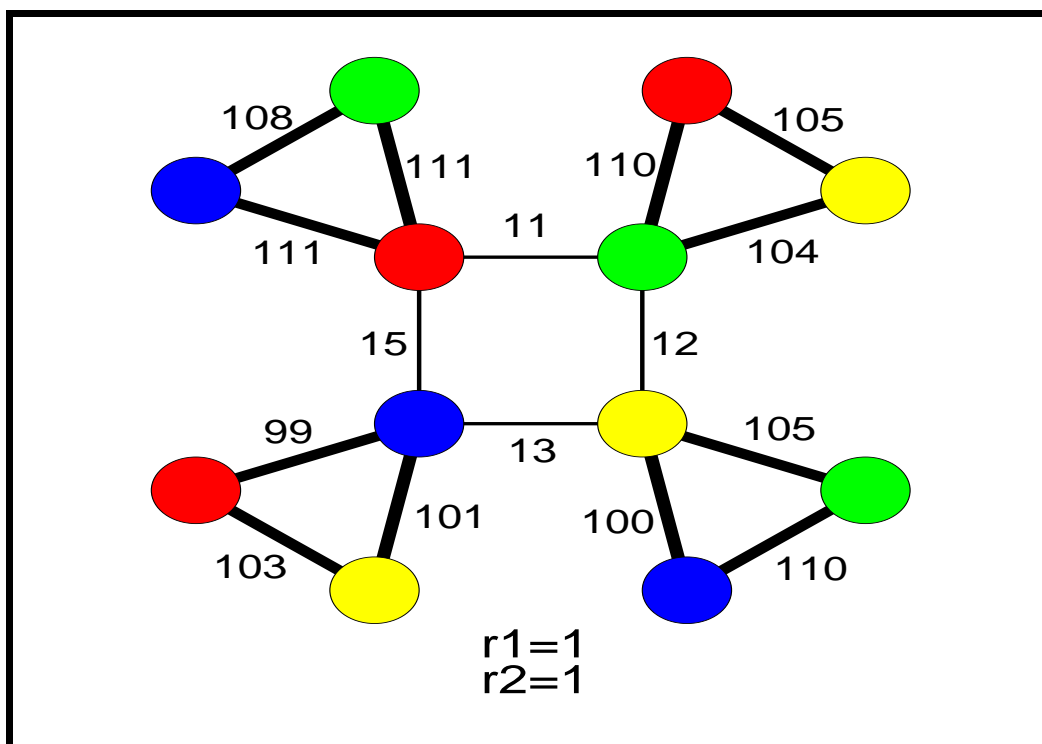
## CAS

### Color Ants System

- Distribution dynamique de systèmes complexes répartis et artificiels d'entités communicantes en interaction sur un ensemble de processeurs ;
- Possibilité de migration des entités sur le réseau reliant les éléments du système.

### Problème à résoudre :

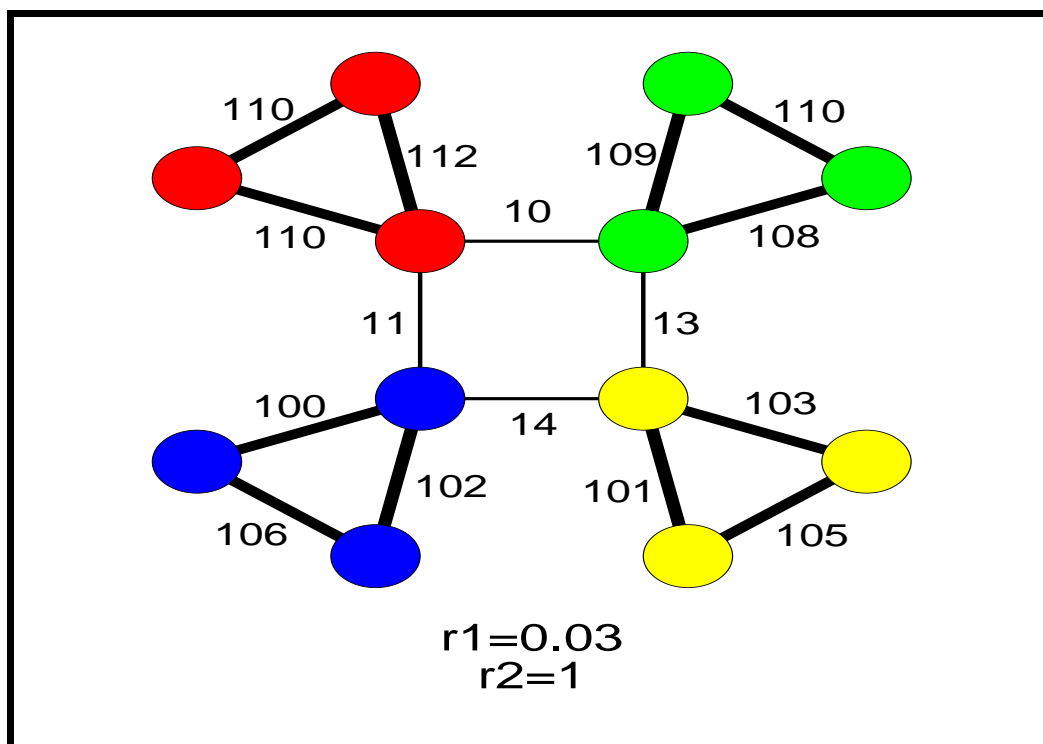
- Réduire les coûts de communications en réallouant **dynamiquement** les entités aux processeurs en cours de résolution ;
- Répartir la charge des processeurs.



50- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

La solution proposée :

- Fourmis artificielles laissant des phéromones colorées :
  - attirant les fourmis de la famille de la couleur déposée ;
  - repoussant les fourmis des autres familles.

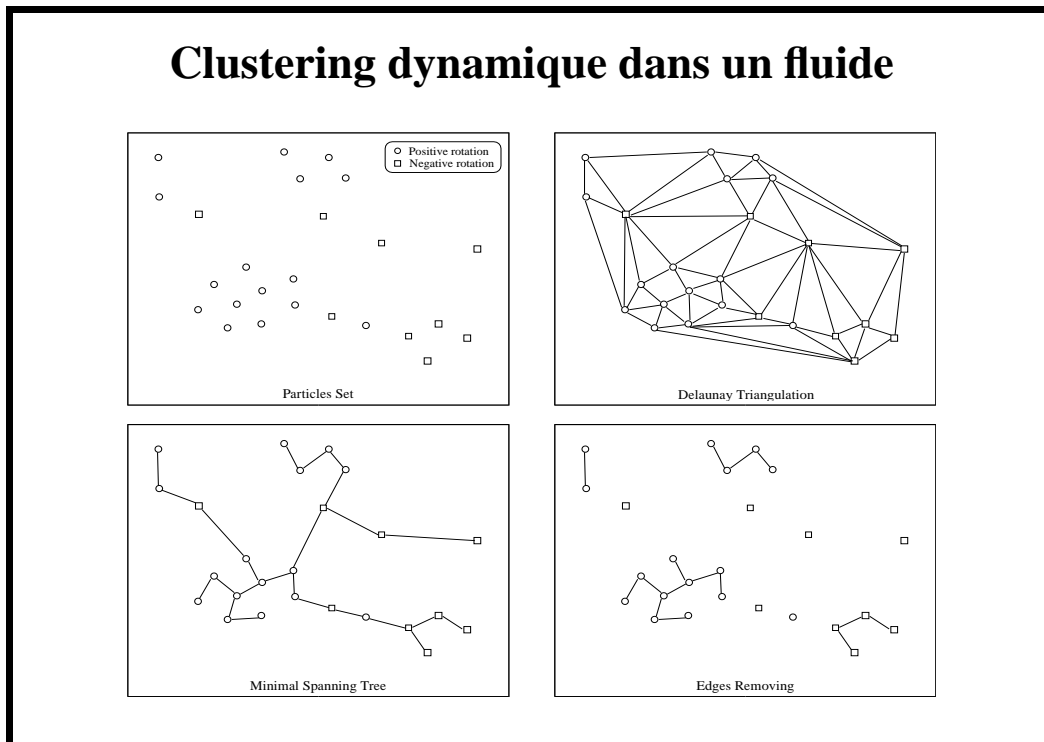


52- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

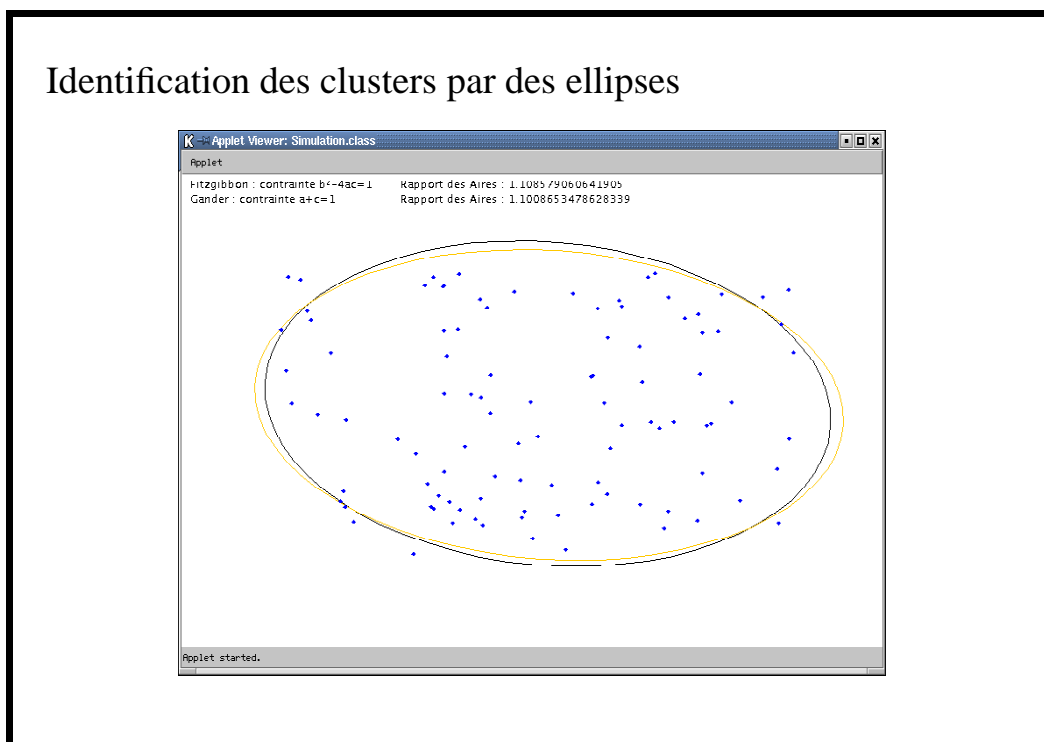
## Ecosystèmes aquatiques estuariens

- Modélisation multi-échelle du fluide porteur des interactions et catalyseur de la formation des organisations
- Clustering dynamique appliqué aux écoulements complexes
- Simulations individus-centrés pour intégrer des composantes hétérogènes (biologiques, p.e.)

53- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes



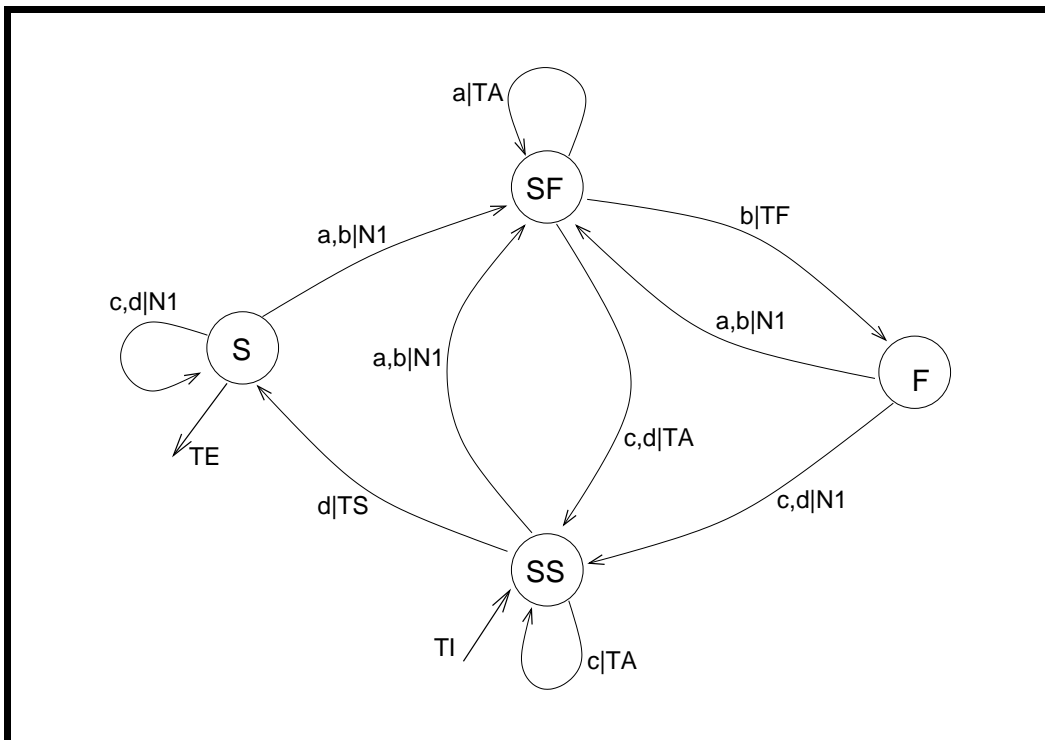
54- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes



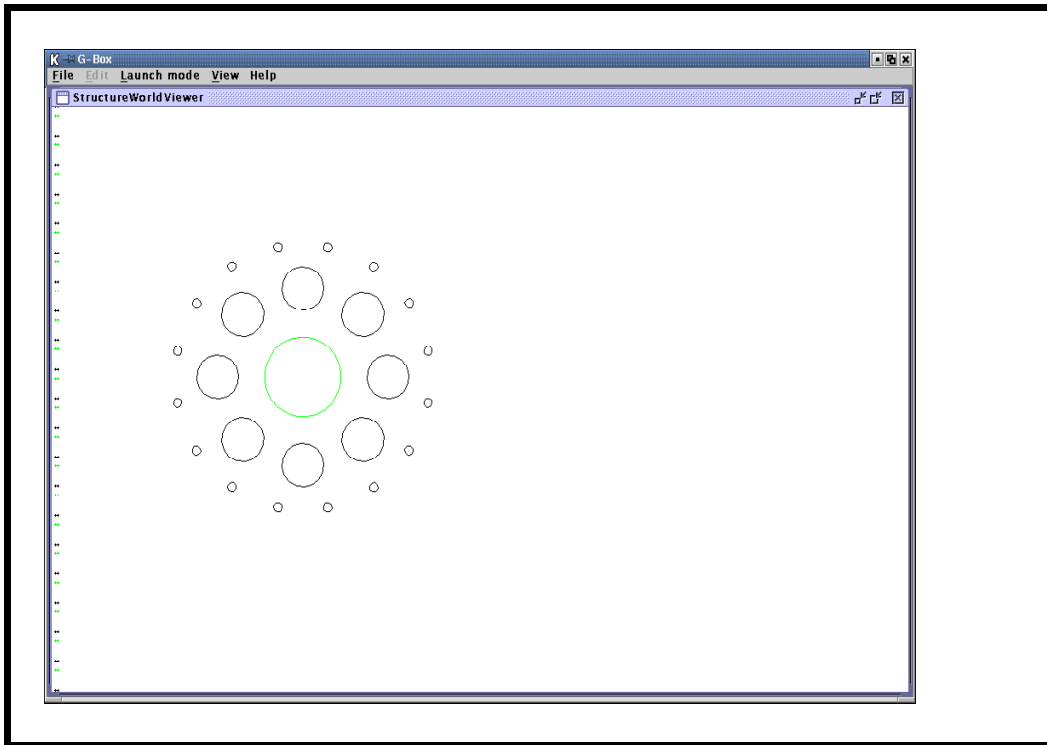
55- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

- Représentation des structures/ellipse : un agent avec une frontière gérant les transferts entre les 2 échelles
- Evolution des structures :
  - Gestion de leur interaction mutuelles en terme de déstabilisation ou de renforcement
  - Utilisation d'un automate à multiplicités comportemental

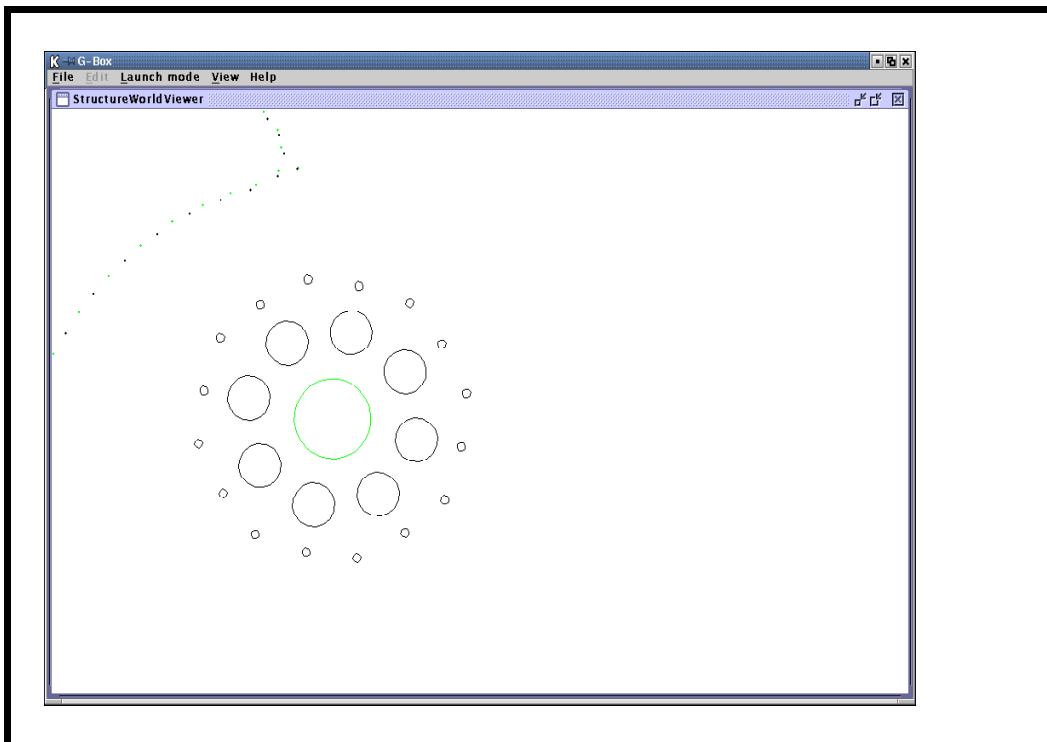
56- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes



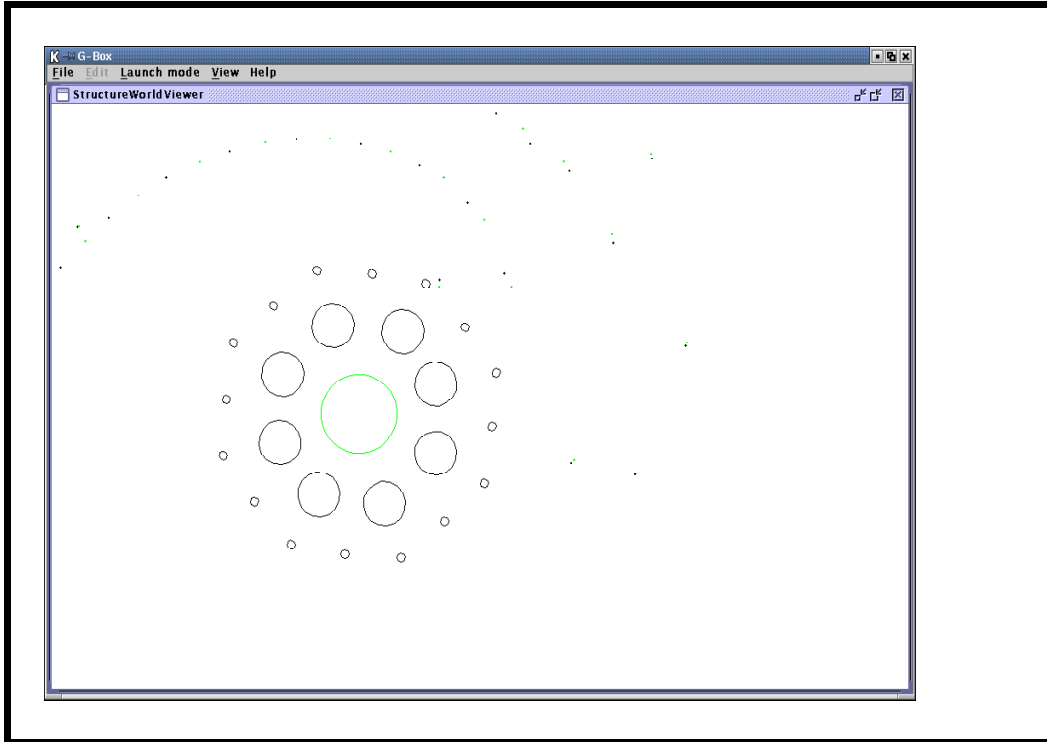
57- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes



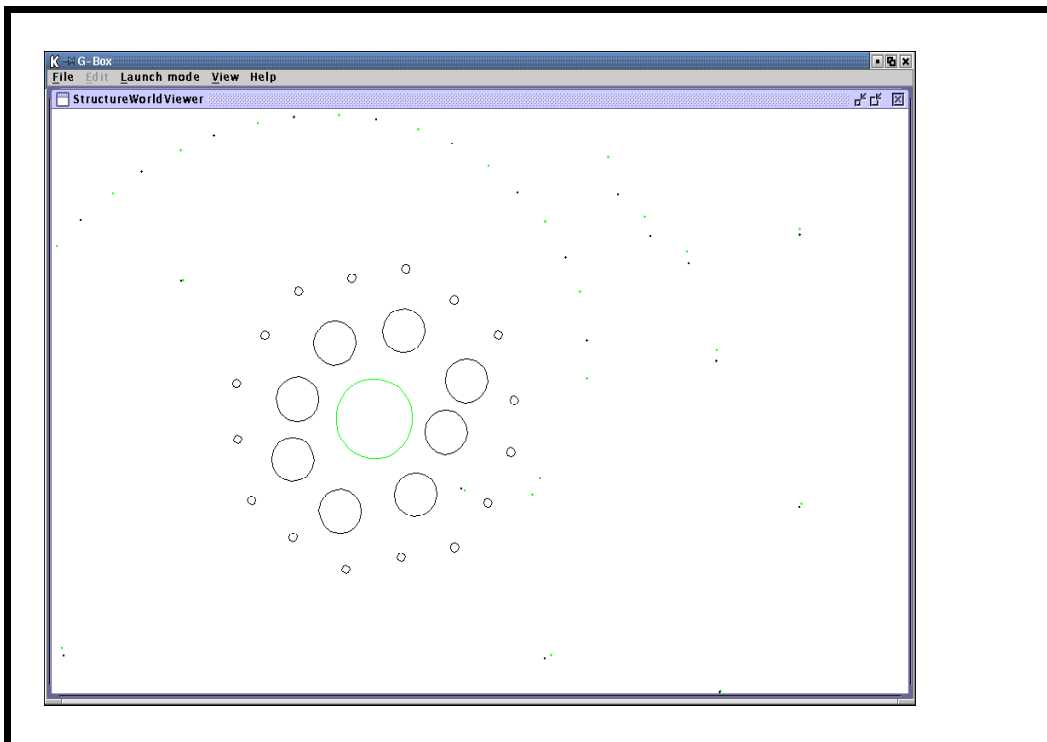
58- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes



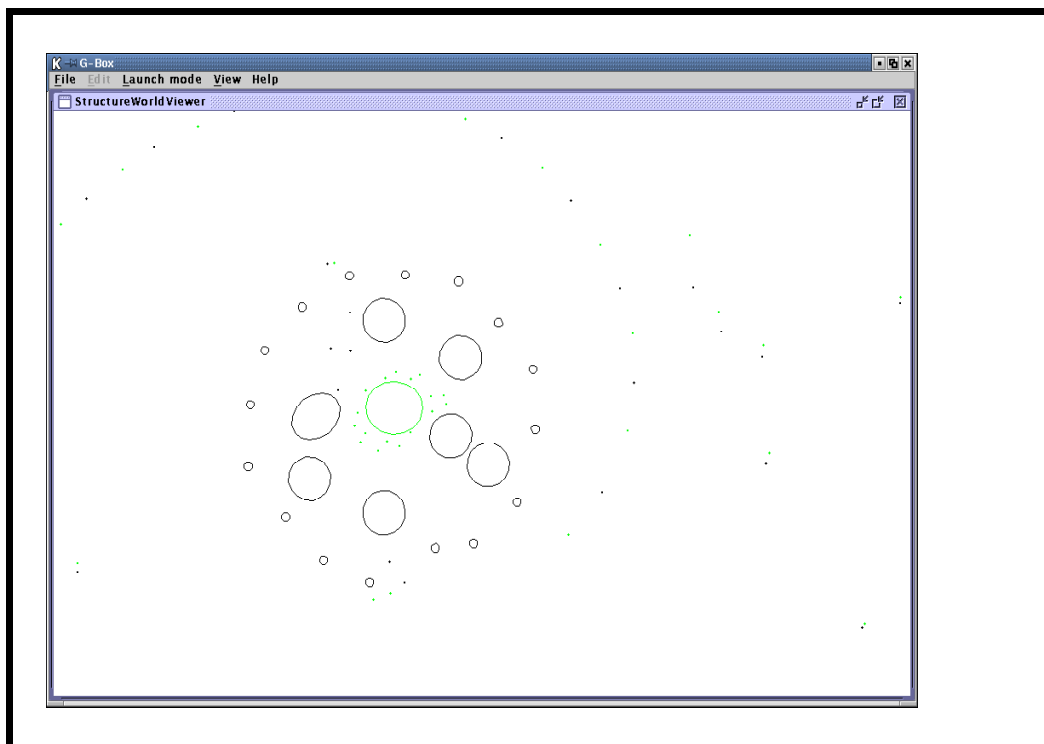
59- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes



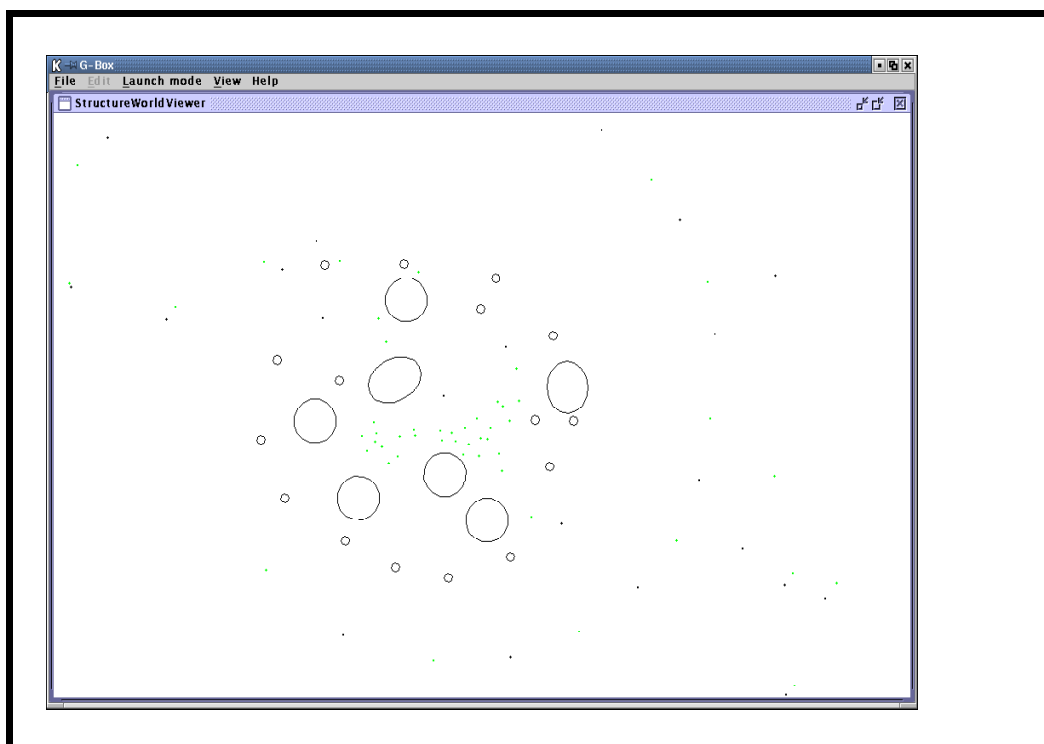
60- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes



61- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

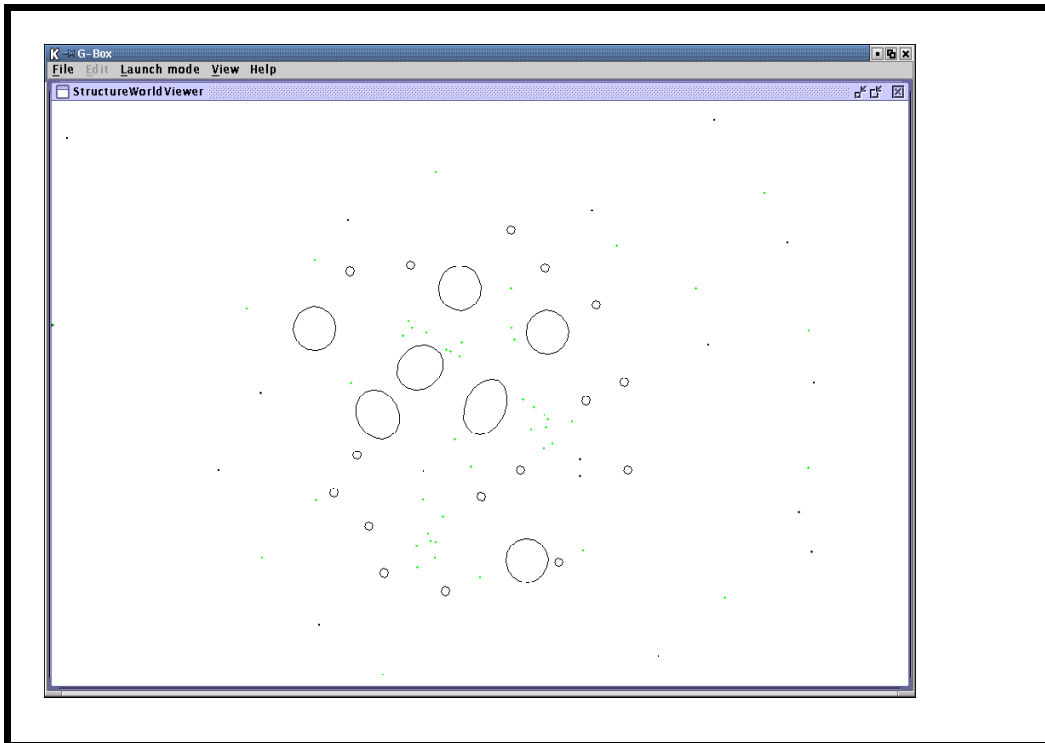


62- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes



63- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes





64- DEA ITA - TCD - Chap. 1 : Introduction sur les systèmes complexes

## **Problème de routage urbain**

- Calgari (Sardaigne - CRS4) : évacuation d'un site urbain, gestion du flux de manière décentralisée par des agents.
- Contrôle décentralisé du trafic routier urbain : comment infléchir un système de circulation par l'introduction de contrainte externes (régulation dynamique et distribuée de feux). Théorie de morphologie couplé à des réseaux de neurones.

## **Algorithmes génétiques dans des modèles de négociation adaptatifs**

- basés sur des automates à multiplicités
- et la théorie de jeux

Tous ces travaux ont été faits en partie par des stagiaires et/ou doctorants du LIH dont la majorité provient du DEA ITA.

## **Travaux personnels de recherche**

### **1. Recherche bibliographique**

Choisir un article parmi les deux alternative suivantes :

- Revue “Complexity International” :  
[www.csu.edu.au/ci](http://www.csu.edu.au/ci)
- Liste d’articles  
[www-lih.univ-lehavre.fr/~olivier/DEA/sujet\\_projet](http://www-lih.univ-lehavre.fr/~olivier/DEA/sujet_projet)

Les consignes du travail à faire sont énoncées à l’adresse web précédente.

**Respecter ces consignes et répondre avec précision aux différentes parties que doit contenir le rapport.**

## 2. Travail d'étude et d'implémentation

Ce travail consiste à étudier et utiliser le projet *mobidyc*, de l'INRA d'Avignon,

<http://www.avignon.inra.fr/mobidyc>.

- Rédiger un rapport de synthèse décrivant ce projet et le comparer à des projets/études analogues trouvés sur Internet ;

- Implémenter une simulation d'un écosystème composé des 3 éléments de base, les producteurs, les consommateurs et les décomposeurs (consignes plus précise sur le site web du TCD ...)
- Rédiger une deuxième partie au rapport précédent, expliquant comment a été fait la simulation précédente sur *mobidyc*. Donner des copies d'écrans commentées des résultats obtenus.

En cas de difficulté d'accès au Web, procéder à l'une des démarches suivantes

- mail à [Cyrille.Bertelle@univ-lehavre.fr](mailto:Cyrille.Bertelle@univ-lehavre.fr)
- Aller voir Cyrille Bertelle, bureau B106 FST Le Havre
- Ecrire par la poste : Cyrille Bertelle  
Faculté des Sciences et Techniques  
25 rue Ph. Lebon - BP 540  
76058 Le Havre

Dans ce cas, donner une adresse postal ou mail où vous joindre.  
Autre contact possible : Damien Olivier (bureau B114).

Deadlines :

- 9 Octobre : envoyer un mail en indiquant l'article choisi ;
- 6 Novembre : rendre le travail de recherche bibliographique par mail (format ps ou pdf) ;
- 4 Décembre : rendre le travail d'étude sur *mobidyc*.

- recherche biblio : 30% note TCD

- travail d'étude : 30% note TCD

... attention à la bonne gestion du planning !

... bon courage !