

Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

A. Cardon, C. Bertelle et D. Olivier
LIH - Laboratoire d'Informatique du Havre

DEA Informatique Théorique et Applications
Ecole Doctorale SPMI - Rouen/Le Havre

0-0

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

6 - Applications des Systèmes Complexes **2ème partie**

- 6.1 Intelligence collective (cf. 1ère partie)
- 6.2 Ecosystèmes
- 6.3 Systèmes évolutifs
- 6.4 Exemples d'implémentation de comportements d'agents

6.2 Ecosystèmes - Plan

1. Approche systémique
2. Modèles analytiques de dynamique de populations et lois écologiques
3. Simulations individus-centrés et système multiagent en modélisation de l'environnement

2- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

Références bibliographiques

- B. Walliser "*Systèmes et modèles*", Editions du Seuil, 1977.
- J.L. Le Moigne "*La modélisation des systèmes complexes*", Dunod, 1990.
- S. Frontier "*Les écosystèmes*", Que sais-je ? n° 3483, 1999.
- S. Frontier et D. Pichod-Viale "*Ecosystèmes*", Dunod, 1998.
- A. Pave "*Modélisation en biologie et en écologie*", Aléas, 1994.

3- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

- P. Coquillard et D.R.C. Hill “*Modélisation et simulation d'écosystèmes*”, Masson, 1997.
- D.L. DeAngelis et L.J. Gross éd. “*Individual-based models and approaches in ecology*”, Chapman et Hall, 1992.
- F. Blasco éd. “*Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*”, Elsevier, 1997.

6.2.1 Approche systémique

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

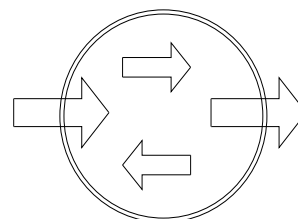
- Ensemble constitutif d'entités en interactions mutuelles et en interaction avec un milieu extérieur ou environnement ;
- Propriétés caractéristiques conférant la structure de système :
 - dépendance interactive des éléments/entités du système, indissociable de leur dynamique (la modification d'une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

- 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)

6- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

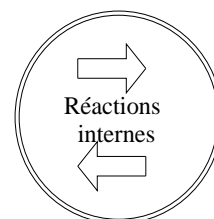
Systemes fermés et systemes ouverts

Systeme ouvert : interagit avec environnement, transfert énergie/matière, permet formation d’organisations émergentes structurantes.



Systeme ouvert

Systeme fermé : coupé du monde extérieur, sans émergence dynamique.



Systeme fermé

7- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

Systèmes complexes

- Ajoute à la notion de systèmes le caractère hétérogène des constituants de nombreux systèmes naturels (biologiques, économiques, ...)
- Dissociation entre “système compliqué” et “système complexe” (d’après J.L. Lemoigne) :
 - système compliqué : on peut le simplifier pour découvrir son intelligibilité ;
 - système complexe : en le simplifiant, on détruit son intelligibilité que l’on ne peut découvrir qu’en le modélisant dans sa totalité.

- 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) ou paradoxales (coexistence d'éléments contradictoires, complémentaires, concurrents ou antagonistes).

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).

Ecosystèmes - Définition

- 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.

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.

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 ;

14- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des 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.

15- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

6.2.2 Modèles analytiques de dynamique de populations et lois écologiques

Pourquoi s'intéresser à ces modèles (dans le contexte de ce cours) ?

- Une vision analytique des écosystèmes donnant des modèles globalisant, synthétisant des propriétés écologiques de population.

Autre point de vue par rapport à l'approche agent ! En opposition ?

- Modélisation ET Conception (d'après E. Bonabeau) : dualité de l'approche sur l'intelligence collective
 - Conception (de type SMA) de systèmes d'entités interactives conduisant à des simulations sur ordinateur. Les lois émergent !
 - Modélisation (de type analytique) : comment vérifier qu'un comportement global peut apparaître à partir d'éléments simples en interaction. On cherche à le formaliser sous une forme la plus simple puis, au vue des limitations, on complète le modèle.

- système artificiel constitué d'une population d'agents évoluant dynamiquement (y compris par génétique).

Intérêt d'avoir des éléments de modélisation synthétique de leur évolution dynamique ...

par exemple, pour l'étude de comportements chaotiques d'un SMA (en terme de dynamique de populations) ... problème difficile et ouvert !

6.2.2 Modèles analytiques de dynamique de populations et lois écologiques

- Définitions
- Modèles analytiques de croissance
- Modèles discrétisés en temps
- Modèles à classes d'âges
- Modèles de dynamique à espèces multiples
- Discrétisations spatiales et temporelles

6.2.2.1 Définition

- **Population** : ensemble des individus d'une même espèce vivant sur un même territoire.
 - individus naturels : animaux, végétaux, bactéries, cellules, ... intervenant dans une chaîne trophique.
 - individus artificiels : agents en interaction et en évolution (on peut espérer retirer de ces lois des éléments de construction de lois locales de coopération, compétition, ... dans des SMA)

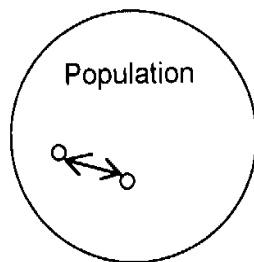
- Sous-populations spécifiques :
 - **générations** : sous-populations se différenciant par une relation parents/enfants ;
 - **classes d'âges** : sous-ensemble d'individus compris entre 2 âges donnés ;
 - **cohortes** : sous-ensemble d'individus d'âges identiques ou voisins, réunis simultanément sur une unité de lieu et que l'on suit dans leur évolution.

6.2.2.2 Modèles analytiques de croissance

- Description de la croissance liée à un individu (poids, longueur) ;
- Description de la croissance d'une population entière ou d'une cohorte (effectif).

Dans les deux cas, on globalise la croissance et les différents facteurs en fonction de leur mode d'action.

Loi exponentielle



- $N(t)$: effectif à l'instant t
- ΔN variation d'effectif pendant la durée Δt .

Hypothèse : Accroissement de population proportionnel à l'effectif et à la durée d'observation.

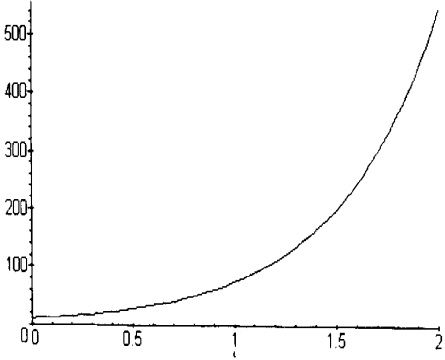
$$\Delta N = kN(t)\Delta t$$
$$\frac{dN}{dt}(t) = kN(t)$$

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt}(t) = kN(t) \\ N(0) = N_0 \end{cases}$$

de solution :

$$N(t) = N_0 e^{kt}$$

Conclusion : peu réaliste si t et N grands.

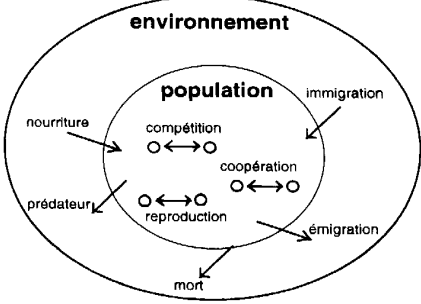


The graph shows a curve starting at (0,0) and increasing exponentially. The x-axis is labeled 't' and has ticks at 0.5, 1, 1.5, and 2. The y-axis has ticks at 100, 200, 300, 400, and 500. The curve passes through approximately (1, 100) and (2, 500).

Loi logistique

Hypothèse : régulation biologique exprimée par un effectif maximum N^* (ressources finies de l'environnement).

$$k(t) = a(N^* - N(t))$$

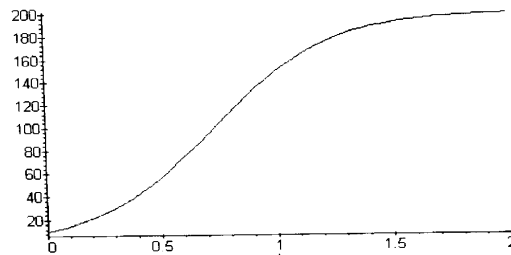


The diagram shows a large outer oval labeled 'environnement'. Inside it is a smaller oval labeled 'population'. Within the population, there are two pairs of circles connected by double-headed arrows, labeled 'compétition' and 'coopération'. Below these is a circle with a plus sign and a double-headed arrow, labeled 'reproduction'. Arrows point from the environment into the population labeled 'nourriture' and 'immigration'. Arrows point from the population out to the environment labeled 'émigration' and 'mort'. A label 'prédateur' has an arrow pointing towards the population from the environment.

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt}(t) = a(N^* - N(t))N(t) \\ N(0) = N_0 \end{cases}$$

de solution :

$$N(t) = \frac{N^*}{1 + \left(\frac{N^*}{N_0} - 1\right) e^{-aN^*t}}$$



26- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

Variantes

- Loi de von Bertalanffy : On ne prend en compte que la partie droite de la loi logistique. Non valide au-dessous d'un certain effectif. Utilisée pour les croissances en longueur ou en halieutique (analyse de pêche).

$$N(t) = N^*(1 - e^{-kt})$$

- Loi de Gompertz : comme la loi Logistique, mais avec $k(t) = a(\ln N^* - \ln N(t))$. Dissymétrie avant et après point d'inflexion. Utilisée pour l'assurance vie et l'extinction de population ($a < 0$).

27- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

6.2.2.3 Modèles discrétisés en temps construction

Discrétisation des fonctions continues à partir d'un pas de temps ΔT (signification biologique : saisons, période entre 2 reproductions, ...) : $N_{n+1} = N(t_0 + (n + 1)\Delta T)$. Loi logistique discrète :

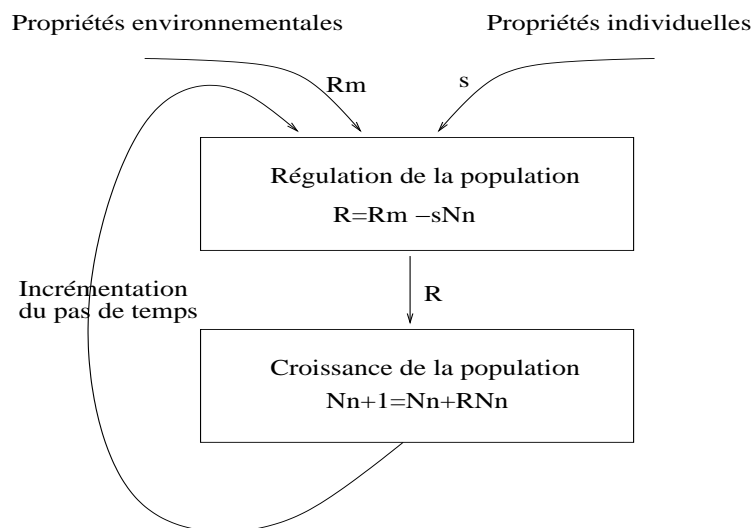
$$N_{n+1} = N_n + a\Delta T(N^* - N_n)N_n$$

$$N_n + (R_m - sN_n)N_n$$

- $R_m = a\Delta T N^*$: taux d'accroissement maximum par individu et pour un pas de temps ;
- $s = a\Delta T$: régulation intra-spécifique.

28- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

Modèles discrets - interprétation



29- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

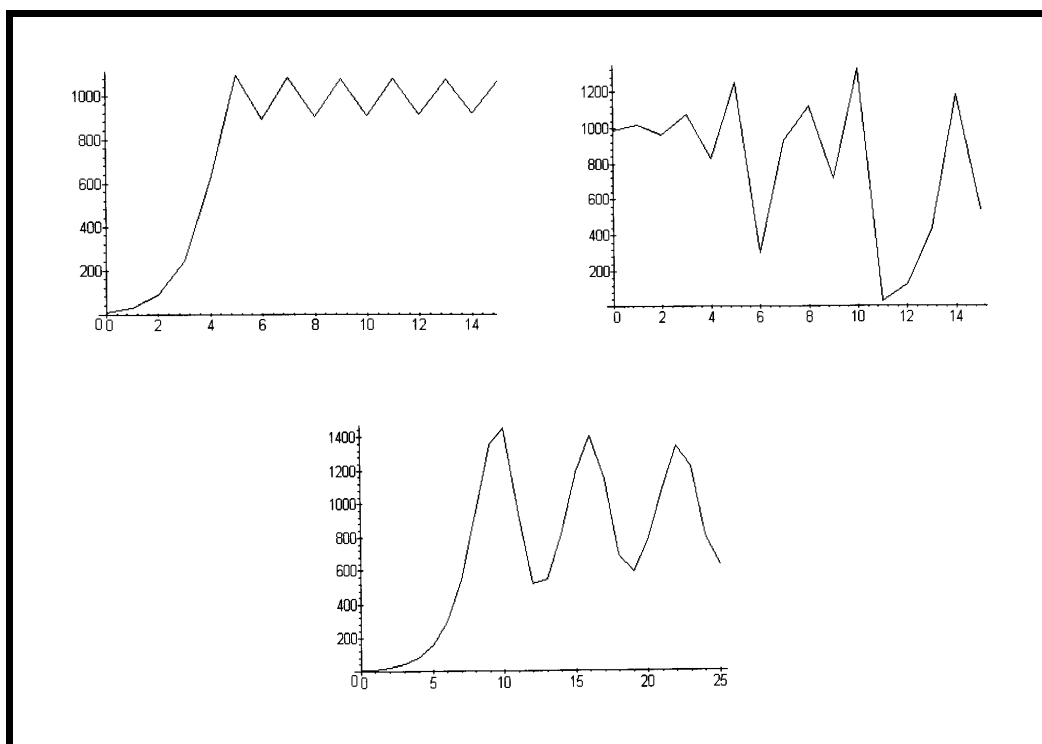
Modèles discrets - Résultats

Situations possibles :

- oscillations + ou - importantes autour de l'effectif maximum, pouvant aller jusqu'à la génération de régimes chaotiques.
- oscillations s'établissant sur plusieurs pas de temps dues à un décalage en temps du terme de régulation.

30- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

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

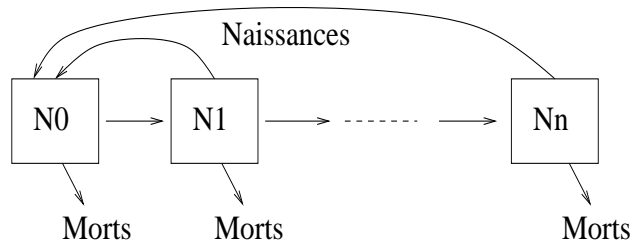


31- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

6.2.2.4 Modèles à classes d'âge

Modèle compartimental :

- population homogène dans une tranche d'âges représentée par un compartiment ;
- dynamique dictée par les flux entre compartiments et/ou avec l'extérieur.



32- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

A chaque itération :

- un individu passe dans la classe d'âge supérieure (avec une probabilité donnée : p_i) ou meurt :

$$N_{i+1} = p_i N_i$$

- il y a naissance dans la première classe d'âge (N_0) en fonction du taux de fécondité des individus dans toutes les autres classes :

$$N_0 = \sum_{j=0}^n F_j N_j$$

33- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

Modèles à classes d'âges - Matrice de transition

Matrice de *Leslie* : matrice de transition de l'instant t à l'instant $t + 1$:

$$\begin{bmatrix} F_0 & F_1 & \dots & \dots & F_n \\ p_0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & p_{n-1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_0(t) \\ N_1(t) \\ \vdots \\ \vdots \\ N_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_0(t+1) \\ N_1(t+1) \\ \vdots \\ \vdots \\ N_n(t+1) \end{bmatrix}$$

6.2.2.5 Modèles de dynamique à espèces multiples - Coopération

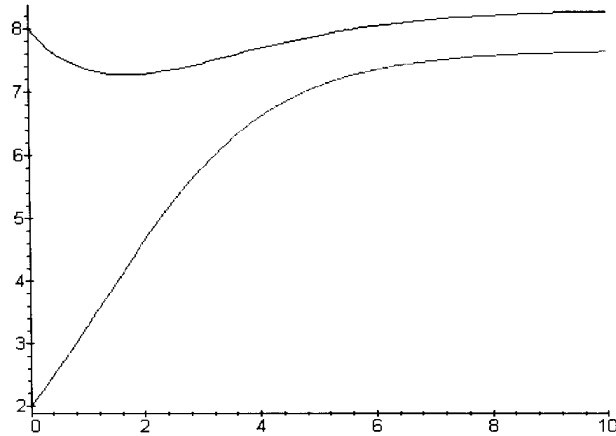
Deux effectifs de population : $N(t)$ et $M(t)$.

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt}(t) = a(N^* - N(t) + bM(t))N(t) \\ \frac{dM}{dt}(t) = c(M^* - M(t) + dN(t))M(t) \end{cases}$$

En supposant $b > 0$ et $d > 0$.

Coopération entre 2 espèces - graphique

Exemple d'évolution possible de 2 espèces en coopérations
pour les valeur : $M^* = N^* = 6$



36- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

Dynamique à espèces multiples - Compétition

Deux effectifs de population : $N(t)$ et $M(t)$.

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt}(t) = a(N^* - N(t) - bM(t))N(t) \\ \frac{dM}{dt}(t) = c(M^* - M(t) - dN(t))M(t) \end{cases}$$

En supposant $b > 0$ et $d > 0$.

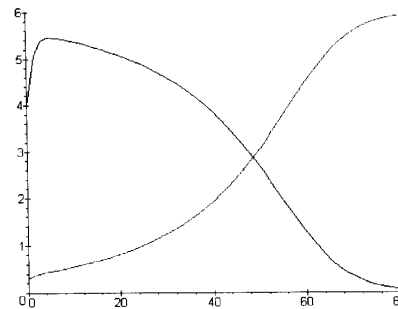
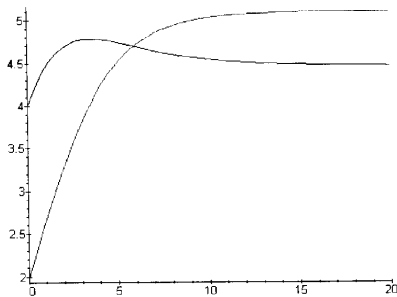
37- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

Compétition entre 2 espèces - graphiques

Dans les 2 cas, on a $M^* = N^* = 6$.

Cas d'une situation d'équilibre avec maintien des 2 espèces.

Cas d'une situation de disparition d'une espèce.



38- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

Dynamique à espèces multiples Loi proie/prédateur (Lotka-Volterra)

- $N(t)$: effectif des proies ;
- $M(t)$: effectif des prédateurs.

Hypothèse :

- évolution des proies
 - sans prédateur, développement suivant une loi exponentielle positive ;
 - avec prédateurs, les proies consommées par les prédateurs sont proportionnelles aux effectifs des proies et des prédateurs.

39- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

- évolution des prédateurs

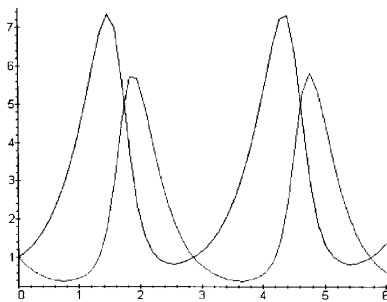
- sans proie, développement suivant une loi exponentielle négative ;
- avec proies, le nombre de prédateurs augmente proportionnellement aux effectifs des proies et des prédateurs.

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt}(t) = aN(t) - bM(t)N(t) \\ \frac{dM}{dt}(t) = -cM(t) + dN(t)M(t) \end{cases}$$

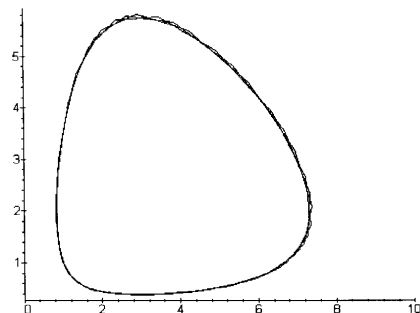
On suppose $a > 0$, $b > 0$, $c > 0$ et $d > 0$.

Loi de Lotka-Volterra - graphiques

Evolution des 2 populations en fonction du temps.



Portrait de phases : évolutions comparées.



6.2.2.6 Discrétisations spatiales et temporelles

- Transfert de lois écologiques locales sur un automate cellulaire.

Principe : On reprend le fonctionnement du jeu de la vie sur un damier en remplaçant l'état binaire d'une cellule par un effectif qui est calculé par l'application d'une loi de dynamique de population discrétisée en temps et basée sur l'effectif antérieur des cellules voisines.

- Approche agents (R. Cazoulat et B. Victorri).
On confronte les lois proies-prédateurs, sous leur formulation différentielle traditionnelle à des simulations analogues individualisées par SMA.

R. Cazoulat et B. Victorri "*Etude de la dynamique des populations par simulation*", Chaos and Society, IOS Press.

6.2.3 Simulations individus-centrés et systèmes multiagents en modélisation de l'environnement

On décrit brièvement un certain nombre de réalisations et d'implémentations basées sur des modèles individus-centrés ou des systèmes multiagents et sur des problématiques de nature écologique.

Swarm/Gecko - www.swarm.org

De nombreuses applications ont été développées avec Swarm, notamment à caractère biologiques ou écologiques.

Gecko est une de ces applications qui permet de simuler des dynamiques d'écosystèmes.

- Les agents sont représentés par des sphères, ils peuvent se déplacer, grossir ou diminuer de volume.
- Des comportements compétitifs sont mis en place pour le partage de ressources nutritives. Des processus de reproduction asexuée sont également implémentés.

- Des systèmes énergétiques individuels sont modélisés et prennent en compte les assimilations, transformations de nourriture, ainsi que les coûts de métabolisme et de croissance.
- Des classes spécifiques pour des végétaux, herbivores et carnivores sont définies.
- On peut ainsi étudier des systèmes trophiques complexes constitués de nombreuses espèces d'individus interagissant entre eux de différentes manières.

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 :

- 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.

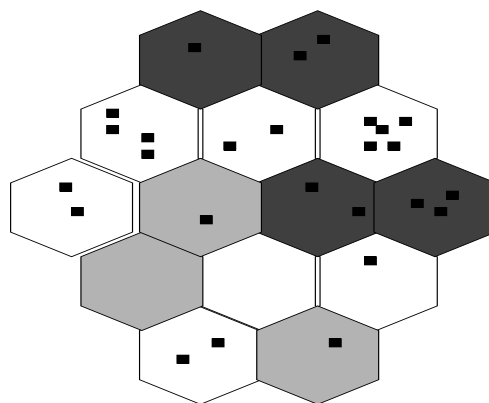
- pêcheurs avec comportement cognitifs. Ils contiennent une base de connaissance comprenant croyances, mémoire et règles de stratégies.
- Plusieurs simulations ont permis de faire des prévisions, dans le cas d'augmentation de l'effort de pêche, sur les modifications induites au niveau de la composition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

Sealab

C. Lepage “*Biologie des populations et simulations individus centrés*”, thèse de l’université Paris 6, 1996 (peut se télécharger).

- Etude de l’influence d’un milieu hétérogène et fluctuant, s’exprimant par l’intermédiaire de comportements reproductifs sur l’abondance d’une population de poissons.
- L’environnement considéré, une portion de milieu marin, est modélisé par un pavage d’hexagones, chacun représentant un fragment d’habitat possédant un indice de conditions hydro-climatiques.

50- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes



- Les individus-poissons se déplacent et se reproduisent dans cet environnement en fonction des conditions d’habitat. Deux stratégies de comportement sont implémentées :

51- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

- comportement “opportuniste” où l’individu se déplace vers les habitats présentant les meilleures conditions ;
- comportement “obstiné” où l’individu recherche toujours des conditions de vie analogues à celles de son début de vie.
- On expérimente l’évolution des populations avec des modifications brutales de l’environnement : seules des populations développant les 2 comportements précédents peuvent survivre.

LIL - Université du Littoral - Equipe Ph. Preux

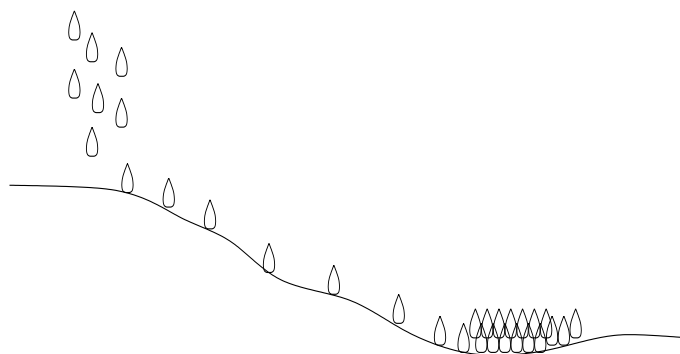
Coopération entre les laboratoires d’informatique et de biologie marine de Lille qui vise à définir des laboratoires virtuels par des SMA pour des études à caractère pluridisciplinaire comme, par exemple, le déplacement de zoo-plancton. Le comportement des agents-individus se fait grâce à des réseaux de Pétri : E. Ramat, P. Preux, Y. Lagadeuc et L. Seuront “*Modélisation et simulation multi-agents en biologie marine - étude du comportement du copéode*”, smaget 98. A télécharger sur le site du LIL.

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.

54- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des 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.

55- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des 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.

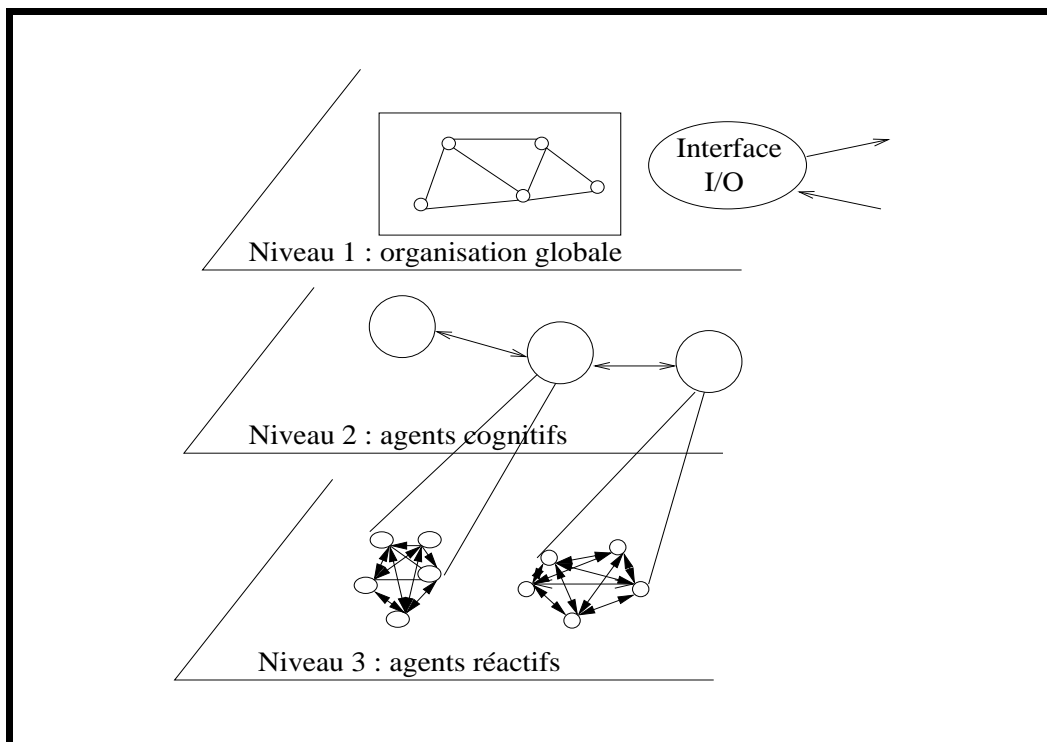
Geamas

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

- **GE**neric **A**rchitecture for **M**ulti**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.

- 3 niveaux d'abstraction basés sur une architecture hybride (agents réactifs + cognitifs) :
 - Niveau 1 : SMA d'organisation globale, gère les entrées/sorties, graphe des objectifs globaux ;
 - Niveau 2 : Agents cognitifs réalisant des buts intermédiaires et décrivant des processus d'interaction, de comportement et d'évolution ;
 - Niveau 3 : Agents réactifs/Micro-agents ou cellules dont l'action est basée sur des stimuli/réponses. Communication et interaction sur un réseau d'accointance.

58- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes



59- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

- Récursivité du modèle : interaction et plongement des différents niveaux les uns dans les autres.
- Interactions inter-niveaux :
 - Décomposition : d'un niveau supérieur vers un niveau inférieur pour prendre en compte soit un évènement extérieur, soit des traitements de lois générales contraignant les agents subordonnés ;
 - Recomposition : d'un niveau inférieur vers un niveau supérieur pour gérer les instabilités provoquées par un individu (intervalle de situation stable propre à chaque agent) sur son organisation (exemple : tas de sable)
- 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).

- Premier niveau global : macro-agent qui renvoie des renseignements statistiques sur la fréquence des éruptions volcaniques ;
- Second niveau : mise en place des agents intermédiaires, rochers complets et lentilles de magma capables d'éjecter du magma lorsque la pression devient trop grande ;
- Troisième niveau : micro-agents de cellules de roches ou de lentilles, capables de déstabiliser les agents de

niveau supérieurs et ainsi d'interagir avec eux par des processus de recomposition/composition.

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) groupe OASIS.

Manta (2)

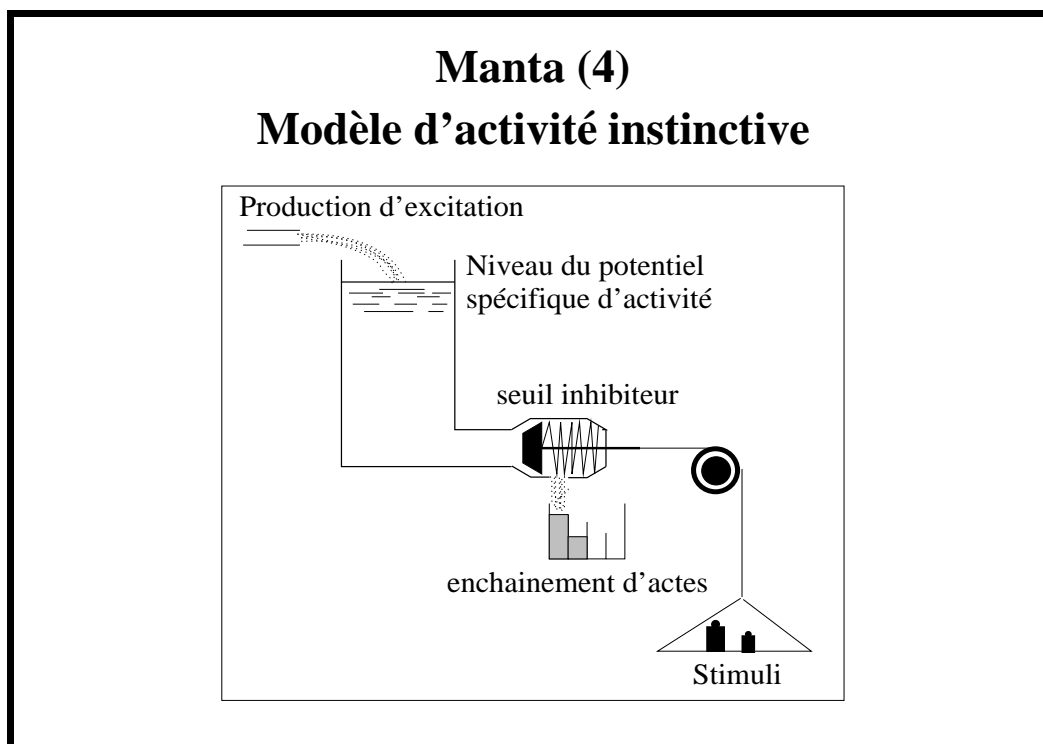
- Modélisation comportementale de fourmis *Ectatomma ruidum* Roger pour l'étude de l'émergence de structures sociales au sein d'une colonie ;
- Application de l'**EthoModeling Framework**.



Manta (3)

EMF

- Proposé par A. Drogoul (1991-2000) ;
- Utilise le modèle d'activité instinctive de Lorenz
Konrad Lorenz
Les fondements de l'éthologie
1984, Champs Flammarion
- Modèle non hiérarchique de sélection de tâches.



L'activité instinctive est :

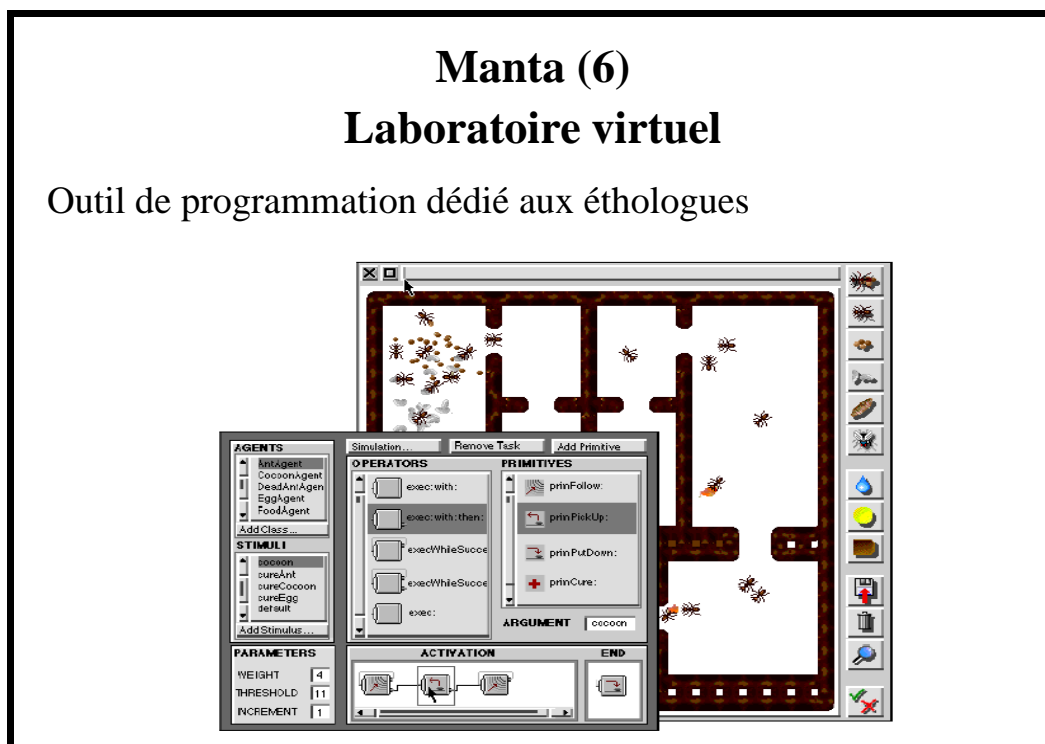
- stéréotypée, la marge de variation chez des individus d'une même espèce est très faible ;
- déclenchée par un stimulus externe spécifique par l'intermédiaire du **Mécanisme Inné de Déclenchement** ;
- le stimulus est renforcé par le **Potentiel d'Action Spécifique** qui correspond à la *motivation interne* de l'animal ;
- la réponse à cela se traduit par un enchaînement d'actes élémentaires.

Manta (5)

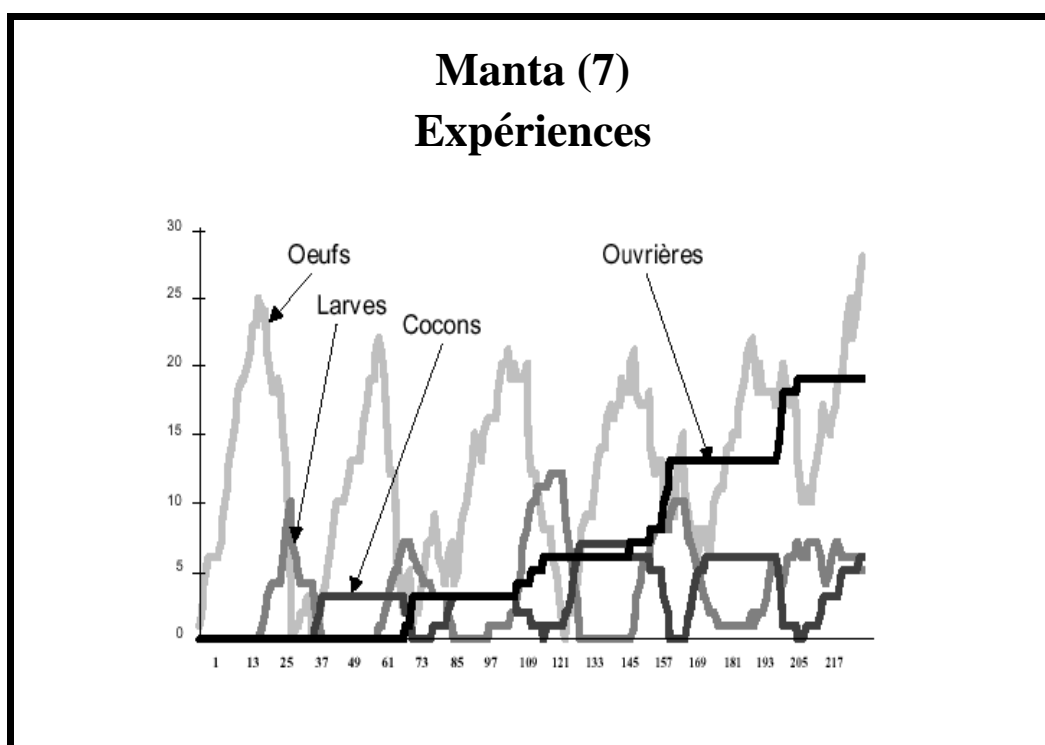
EMF

- Il s'agit d'agents réactifs.
- Le comportement d'un agent est modélisé par un ensemble de tâches indépendantes, composées d'une séquences de comportements (actes) élémentaires qui sont les primitives.
- Chacune de ces tâches est exclusive et est interruptible, son déclenchement provient de l'intensité des stimuli perçus par l'agent qui se combine avec la motivation préexistante de l'agent.
- Celle ci s'exprime en fonction d'un seuil inhibiteur et d'un

ponds qui traduit le renforcement et l'habituat



70- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes



71- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des 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 (8)

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.

6.3 Systèmes évolutifs - Plan

1. Algorithmes génétiques
2. Stratégies évolutives
3. Classifieurs génétiques
4. Le modèle ECHO de J. Holland

Références bibliographiques

- J.H. Holland “*Hidden order : how adaptation builds complexity*” , Perseus books, 1995.
- J.C. Heudin “*La vie artificielle*”, Hermès, 1994.
- D.E. Goldberg “*Genetic algorithms*”, Addison-Wesley, 1989.
- Ph. Preux “*Les algorithmes évolutifs*”, rapport de recherche LIL-94-1 (<ftp://ftp-lil.univ-littoral.fr/pub/users/preux/paper/lil-94-1.ps.gz>).

- Echo : www.santafe.edu/projects/echo/echo.html
- B.Cuvelier, Ph. Preux et C. Cambier “*Studying adaptation with Echo*”, rapport de recherche LIL (<ftp://ftp-lil.univ-littoral.fr/pub/users/preux/paper/eca197.ps.gz>).

6.3 Systèmes évolutifs - Introduction

S’inspire du Néo-Darwinisme, synthèse de la théorie de la sélection naturelle (Darwin) et de la théorie de l’hérédité (Mendel) :

- Evolution : résultat d’une altération progressive des êtres vivants au cours des générations ;
- Reproduction basée sur le caractère génétique qui subit au cours des générations des recombinaisons et des mutations ;
- Mécanisme de sélection naturelle.

Une des caractéristiques du vivant : les individus n’ont pas été “programmés” pour répondre à un problème spécifique, mais ils évoluent en s’adaptant à leur environnement.

Objectif : construire des systèmes informatiques sur la base de ce modèle.

6.3.1 Algorithmes génétiques

Principe

La propriété d’adaptation des individus s’interprète comme une recherche d’optimum d’une fonction (la survie).

Principe : On génère initialement un grand nombre d’individus (ou solutions) et l’algorithme les fait évoluer en 3 phases :

1. Reproduction
2. Croisement
3. Mutation

Le processus de sélection est basé sur une fonction d’évaluation (ou fonction objectif) qui correspond à une

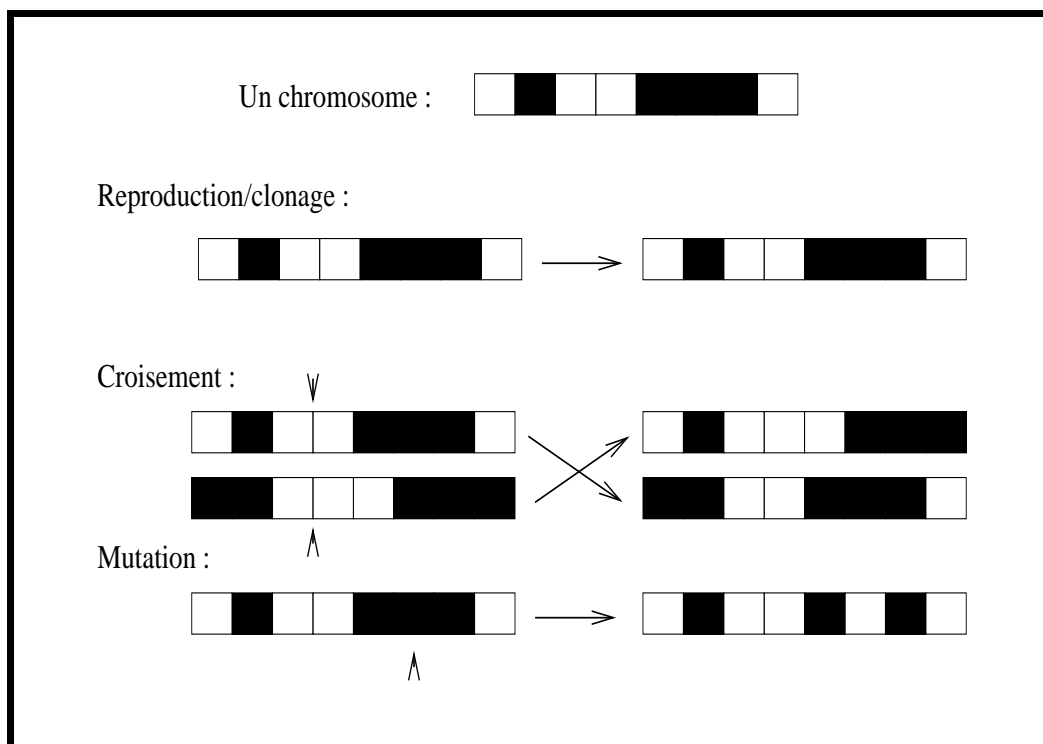
performance de l'individu. On en déduit une probabilité pour chaque individu de se reproduire ou de générer des clones (cette probabilité s'appelle *fitness*).

Finalement, ce processus contribue à produire une population ayant une meilleure adaptabilité (convergence vers l'optimum).

Algorithmes génétiques

Formalisation

- Les individus sont représentés par des *chromosomes* constitués *d'allèles* (chromosome = chaîne d'informations sur un alphabet fini).



Algorithmes génétiques

Exemple de base

- Population totale possible : nombre compris entre 0 et 31 en codage binaire sur 5 bits (00000 à 11111).
- Problème : On recherche le maximum de la fonction $f(x) = x^2$ sur cet ensemble.

- Population initiale constituée de 4 individus choisis arbitrairement :

13 de code 01101

24 de code 11000

8 de code 01000

19 de code 10011

- Fonction de performance pour chaque individu : correspond à $f(x) = x^2$. On en déduit la fonction fitness qui est une répartition par pourcentage de ces performances :

84- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

Individu	performance	fitness
13	169	0,14
24	576	0,49
8	64	0,06
19	361	0,31

- Reproduction : on tire au hasard 4 nouvelles chaînes parmi les existantes en tenant compte de la valeur de répartition. On obtient, par exemple : 13, 24, 24 et 19.

85- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

- Croisement : on prend les individus 2 par 2. On coupe les chromosomes à une position aléatoire et on croise les parties coupées

$$\left\{ \begin{array}{l} 13 : 0110 \parallel 1 \quad \searrow \nearrow \quad 01100 \quad : 12 \\ 24 : 1100 \parallel 0 \quad \nearrow \searrow \quad 11001 \quad : 21 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 24 : 11 \parallel 000 \quad \searrow \nearrow \quad 11011 \quad : 27 \\ 19 : 10 \parallel 011 \quad \nearrow \searrow \quad 10000 \quad : 16 \end{array} \right.$$

86- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

- Mutation : on opère par tirage aléatoire à partir d'une probabilité de mutation définie initialement. On prend ici 0,05 donc sur les 20 bits des 4 chromosomes, on suppose qu'un seul allèle a été sélectionné et mute.

$$12 : 01\underline{1}00 \rightarrow 01000 : 8$$

- La nouvelle génération est donc : 8, 21, 27, 16. Si on somme les performances, on obtient 1490 au lieu de 1170 à la génération précédente

87- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

Algorithmes génétiques

Améliorations possibles

Les améliorations possibles peuvent être nombreuses ...

- Autres opérateurs que le croisement et la mutation :
inversion de sous-chaînes, croisement à partir d'un masque binaire (dont les valeurs indiquent les positions de croisement), etc ...
- Variante inspirée de la théorie des niches écologiques et des espèces : on conserve en partie la population de la génération précédente.

- Préselection : un enfant remplace un parent si sa performance est meilleure, sinon le parent reste.
- Conservation et sélection d'individus suivant des critères de similarités entre eux.
- ...

6.3.2 Stratégies évolutives

D'après Ingo Rechenberge (Allemagne). Assez voisins des algorithmes génétiques (J. Holland / USA), les différences essentielles sont :

- Les individus ne sont pas codés par des chromosomes mais par des valeurs réelles ;
- Moins d'aléatoire : la reproduction est déterministe ;
- L'opérateur de mutation agit principalement et l'opérateur de croisement est moins important : il agit simplement pour assurer une diversité suffisante.

6.3.3 Classifieurs génétiques

Système capables d'apprendre des règles pour optimiser leurs performances dans un environnement perçu sous forme de messages.

Il est constitué de 3 parties principales :

- Un système de règles ;
- Un système d'attribution de crédit ;
- Un algorithme génétique.

Classifieurs génétiques

Systeme de règles

Une règle peut s'écrire sous la forme :

<cond> : <resultat>

exemple :

01#0 : 0111

- Sélection d'un message binaire de 4 bits commençant par 01 et se terminant par 0 ;
- Si acceptation d'un message, on renvoie le message 0111.

Classifieurs génétiques

Systeme d'attribution de crédits

Systeme de compétition entre les règles qui possèdent chacune un crédit variable. Lorsqu'un message arrive :

- Les règles qui peuvent le sélectionner font une offre proportionnelle à leur crédit actuel ;
- Le système d'attribution sélectionne les règles qui offrent le plus et les active ;
- Une règle activée renvoie son message de résultat et offre une récompense correspondant à son crédit pour les règles qui auront sélectionnées son message émis.

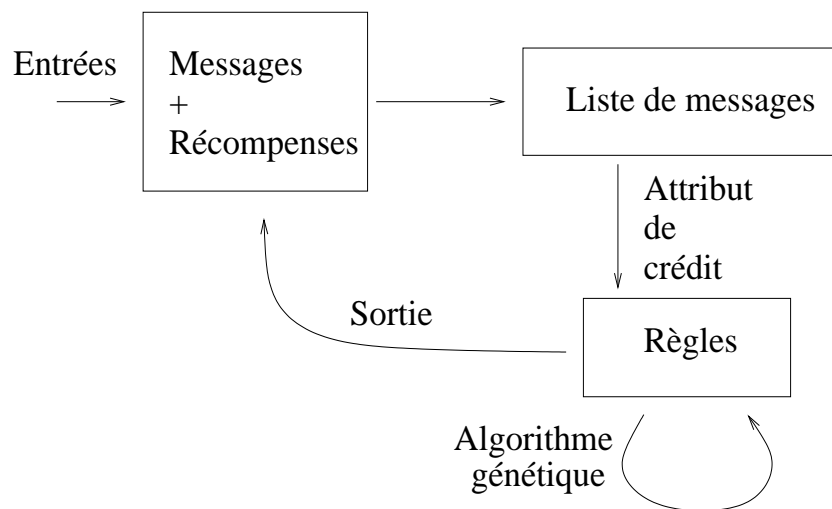
Classifieurs génétiques

Algorithme génétique

- Un algorithme génétique est mis en place sur la population des règles ;
- La fonction de performance est directement le crédit associé à chaque règle ;
- On sélectionne, reproduit, croise et fait muter les règles les plus performantes.

94- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

schéma de fonctionnement d'un classifieur génétique



95- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

6.3.4 Le modèle Echo de J. Holland

- Ensemble d'agents situés dans un environnement nutritif ;
- Comportement des agents déduit de leur génomes ;
- Interactions entre agents de nature variée : reproduction, compétition, coopération ;
- Performance/fitness des agents : leur capacité de survie.

Echo - Caractéristiques

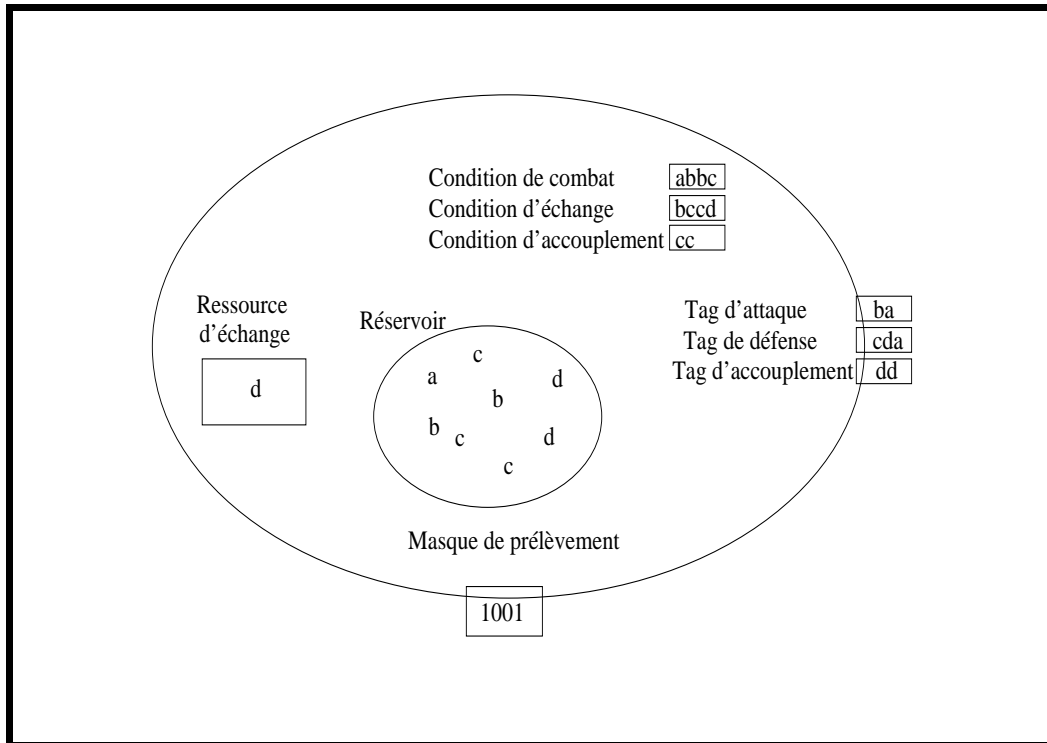
- Temps discret et monde représenté par une grille torique ;
- Déplacement possible d'un agent dans une case voisine à chaque pas de temps ;
- Interactions possibles entre agents que s'ils sont sur des cases voisines ;
- Les comportements des agents sont contrôlés par des gènes spécifiques appelés *conditions* ;
- Les agents ont des signes extérieurs apparents ou "tags" représentatifs de leur état social. Ces tags sont représentés par des gènes spécifiques ;

- Reproductions sexuelles ou asexuelles permettant l'évolution du génotype ;
- Chaque site produit une quantité de ressources spécifiques à chaque pas de temps. Il y a 4 variétés de ressources : a, b, c et d sur lesquelles est basée la survie de chaque agent ; Ce sont les "molécules" de base du monde Echo. Elles sont les constituants du génôme des agents et forment pour cela des chaînes (simple chaînage, pas de réaction chimique). Il n'y a pas d'interaction entre les gènes d'un génôme.

Echo - Agents

Contitués de 2 éléments :

1. Chromosome codant le comportement et l'apparence (tag) des agents : ce sont des chaînes de ressources (appelés aussi *nucléotide*) ;
2. Un réservoir de ressources stockées dans chaque agent.



Echo - Chromosomes d'un agent

Contitués de 8 gènes au total

- 3 gènes de tag : tag d'attaque, tag de défense et tag d'accouplement ;
- 3 gènes de conditions (comportementales et sociales) : condition de combat, condition de négociation et condition d'accouplement ;

- 2 gènes de tags pour les échanges de ressources :
 - Ressources d'échanges : type de ressource que peut donner l'agent à un autre au cours d'une négociation ;
 - Masque de prélèvement : masque binaire d'un bit par type de ressources. Une ressource peut être acquise dans l'environnement que si le bit correspondant vaut 1.

D'autres possibilités d'échanges de ressources : suite à un combat ou par transmission filiale.

Echo - Auto-reproduction

Lorsque la quantité de ressources du réservoir de l'agent est suffisamment importante,

- il y a génération d'un clône auquel on transmet une quantité des ressources ;
- le chromosome du clône est obtenu par copie + mutation.

Echo - Mutation

Dans Echo, les mutations agissent sur les gènes.

Sur les tags et les conditions, 3 types de mutation sont permis :

- suppression du dernier nucléotide du gène ;
- insertion d'un nucléotide à la fin du gène ;
- modification d'un nucléotide dans le gène.

Sur les ressources d'échanges, seule la modification est permise. Sur le masque de prélèvement, la mutation correspond à la modification d'un bit.

Echo - Interactions entre les agents

Elles sont contrôlées par les tags et les conditions. Deux agents proches peuvent interagir :

- par indifférence ;
- par échange ;
- par reproduction et génération de nouveaux agents avec croisements génétiques.

Les interactions sont contrôlées par un mécanisme de préfixe : elles ne peuvent se produire que si la condition est le préfixe du tag associé.

Agent A	Agent B
Condition de combat : <u>ab</u>	Tag d'attaque : <u>abb</u>
Tag d'attaque : <u>bcd</u> Condition d'échange : <u>ab</u>	Condition d'échange : <u>b</u> Tag d'attaque : <u>abb</u>
Tag d'accoupl. : <u>dcd</u> Condition d'accoupl. : <u>a</u>	Condition d'accoupl. : <u>dc</u> Tag d'accoupl. : <u>adb</u>

- L'agent A peut attaquer l'agent B ;
- Les deux agents peuvent procéder à des échanges ;
- Les deux agents peuvent s'accoupler.

Echo - Combat
<ul style="list-style-type: none"> • Les combats se produisent si les conditions sont réalisées et avec une certaine probabilité ; • Dans le cas d'un combat, on compare 1 à 1 les nucléotides du tag d'attaque d'un agent avec le tag de défense de l'autre afin d'obtenir un score. La probabilité d'être le vainqueur correspond au rapport de son score sur la somme des 2 scores. • Le vainqueur remporte toutes les ressources du vaincu, y compris celles qui constituent son génôme. Le vaincu est retiré du monde.

Echo - Accouplement

Reproduction par croisement de deux sous-chaînes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{agent } A : ab||bc|bd||cd \quad \searrow \nearrow ab||bd||cd \\ \text{agent } B : b||bd||ca \quad \nearrow \searrow b||bc|bd||ca \end{array} \right.$$

Les longueurs des gènes des ressources d'échange et du masque de prélèvement doivent être constantes.

Echo - Cycle de base

1. interaction entre des agents sélectionnés ;
2. alimentation des agents par distribution des ressources de l'environnement ;
3. mort accidentelle des agents ;
4. renouvellement des ressources de l'environnement.

6.4 Exemples d'implémentation de comportements d'agents

1. l'éco-résolution : modèle décentralisé de résolution de problèmes
2. le dilemme du prisonnier : modèle de coopération/compétition adaptative

6.4.1 L'éco-résolution : modèle décentralisé de résolution de problèmes

Références bibliographiques

- J. Ferber "*Les systèmes multi-agents*", InterEditions, 1995.
- A. Drogoul et C. Dubreuil "*Eco-Problem Solving : Results of the N-Puzzle*" in *Decentralized Artificial Intelligence 3*, Y. Demazeau et E. Werner Ed., North Holland, 1992.

Principes de l'éco-résolution 1/2

- Basé sur des agents réactifs ;
- On cherche un état stable considéré comme la solution du problème ;
- Le plan est un effet de bord du comportement des agents.

112- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

On cherche à définir une population d'agents dont l'ensemble des comportements tend à aboutir à un état stable que l'on considère comme la solution du problème. Chaque agent est autonome et à une vision locale du monde. Les actions qu'il entreprend sont la conséquence de sa perception locale et des relations qu'il a établies avec d'autres agents.

Les agents au cours de l'éco-résolution effectuent des actions qui si elles sont enregistrées, correspondent directement aux actions qui doivent être planifiées par un système centralisé pour aboutir au résultat. Le plan est alors un effet de bord du comportement des agents.

Principes de l'éco-résolution 2/2

- Pas d'exploration globale de l'espace des états ;
- Résistance au bruit ;
- Résolution du problème, incrémentale et réactive ;
- Peu d'explosion combinatoire.

113- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

- Pas d'exploration globale de l'espace des états. Les états du monde ne sont pas directement utilisés par l'éco-résolution. Cette approche s'oppose donc aux techniques de recherche avec graphes, dans laquelle on développe une partie du graphe des états avec une stratégie de contrôle et une heuristique. On prend en compte, en fait, uniquement les états internes des agents et leur perception de l'environnement.
- Résistance au bruit. C'est un des aspects très intéressants de cette technique. Une perturbation ne modifie pas le mécanisme de résolution. On peut donc travailler dans un monde qui évolue dynamiquement. La résolution du problème est incrémentale et réactive.
- Peu d'explosion combinatoire.

Les éco-agents

Un agent possède un comportement élémentaire :

- Il cherche à se satisfaire ;
- Il peut être gêné par d'autres agents ;
- Il peut agresser un agent qui le gêne ;
- Il peut chercher à fuir s'il est agressé ;

114- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

Les agents possèdent un comportement élémentaire basé sur un automate à états finis. Ils cherchent à se satisfaire et peuvent être gênés par d'autres agents qu'ils agressent alors. Ces gêneurs doivent alors fuir et pour fuir ils peuvent eux-mêmes être obligés d'agresser d'autres agents.

Structure d'un éco-agent

Chaque agent à :

- Un but ;
- Un état interne ;
- Des actions élémentaires ;
- Une fonction de perception des généurs ;
- Des accointances ;
- Des dépendances.

115- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

- Un but, c'est-à-dire un autre agent avec lequel il a une relation particulière, appelée relation de satisfaction.
- Un état interne - L'état de l'agent peut être *satisfait, en recherche de satisfaction ou en recherche de fuite*. Le passage d'un état à un autre est décrit par un automate à états finis.
- Des actions élémentaires, elles dépendent du domaine et correspondent aux comportements de satisfaction et de fuite des agents.
- Une fonction de perception des généurs. Les généurs sont les agents qui l'empêchent de fuir ou de se satisfaire.
- Des accointances, elles sont constituées par d'autres agents.
- Des dépendances, ce sont les agents dont l'agent courant est le

but et ces dépendances ne peuvent être dans un état de satisfaction uniquement si l'agent courant est satisfait. Ces dépendances sont produites par la définition des buts et donc par l'établissement des relations de satisfaction.

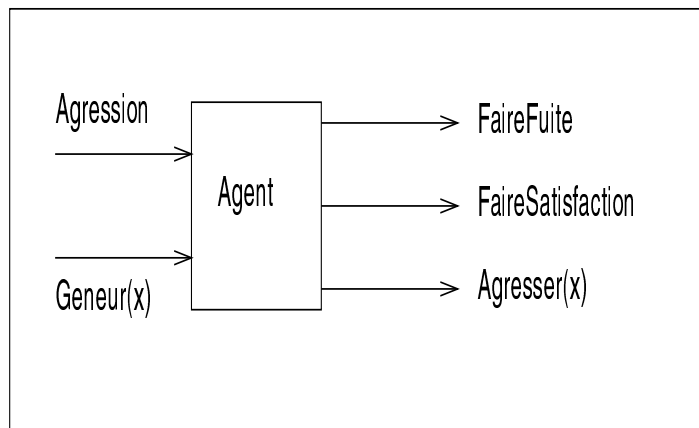
A est directement dépendant de B si A est dans les dépendances de B, ce qui revient à dire si B est un but pour A. "Être dépendant de" est une relation d'ordre partielle définie comme suit : A est dépendant de B si A est directement dépendant de B ou s'il existe un autre agent tel que A soit directement dépendant de C et C soit dépendant de B.

115-2

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

Modèle comportement d'un éco-agent

Automate à états finis :



Deux entrées :

- L'agression par un autre agent ;
- Le fait d'avoir des gêneurs.

Trois sorties :

- FaireFuite, cela consiste à réaliser effectivement l'action de fuite ;
- FaireSatisfaction se charge de réaliser l'opération dont le résultat aura pour conséquence que l'agent vérifie sa condition de satisfaction.
- Agresser(x)

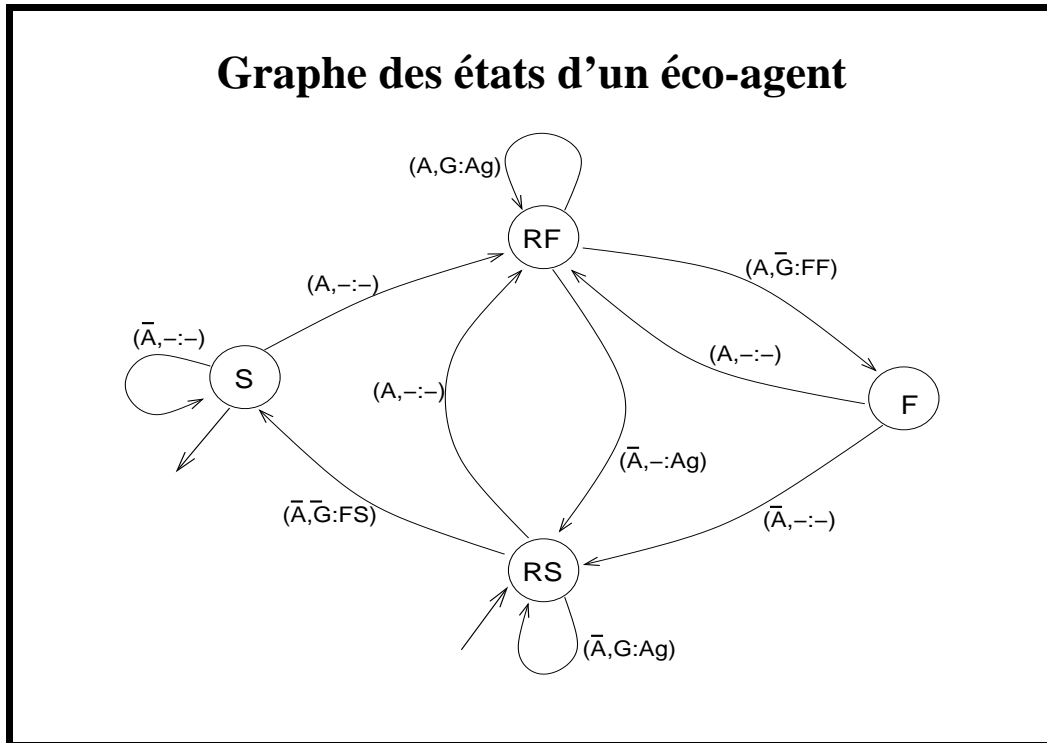
116-1

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

Quatre états pour un agent :

- La satisfaction (S) ;
- La recherche de satisfaction (RS) ;
- La recherche de fuite (RF) ;
- La fuite (F)

L'état initial est RS.



118- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

a et g correspondent aux variables d'entrée agression, généurs, !a et !g à la négation et - indique qu'il n'y a pas d'actions effectuées en sortie.

Le comportement d'un agent est donc simple :

- Recherche de satisfaction ;
- Obligation de fuite.

119- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

Les éco-agents cherchent à se trouver dans l'état (S). Si cela n'est pas possible parce qu'il y a des généurs, ils les agressent.

Modèle comportement d'un éco-agent (3)

- Si le but d'un agent n'est pas satisfait, l'agent demande à son but de se satisfaire et devient une dépendance de cet agent.
- Quand un agent se satisfait, il informe ses dépendances qu'elles peuvent se satisfaire.
- Quand un agent ne peut se satisfaire, il recherche les généurs parmi ses accointances et les agresse.
- Quand un agent cherche à fuir, il recherche les généurs parmi ses accointances et les agresse.

```
Entrée : x agent en recherche de satisfaction
Appel : essayerSatisfaire(x)

DEBUT
  SI le but de x est satisfait
    ALORS POUR tous les agents y qui gênent x FAIRE
      faireFuir(y, x, but(x))
    FPOUR
  DES qu'il n'y a plus de généurs
    ALORS faireSatisfaction(x)
  FDES

FSI
FIN
```

faireSatisfaction() se charge de réaliser l'opération dont le résultat a pour conséquence que l'agent vérifie sa condition de satisfaction. Cette fonction est donc dépendante du domaine d'application.

121-1

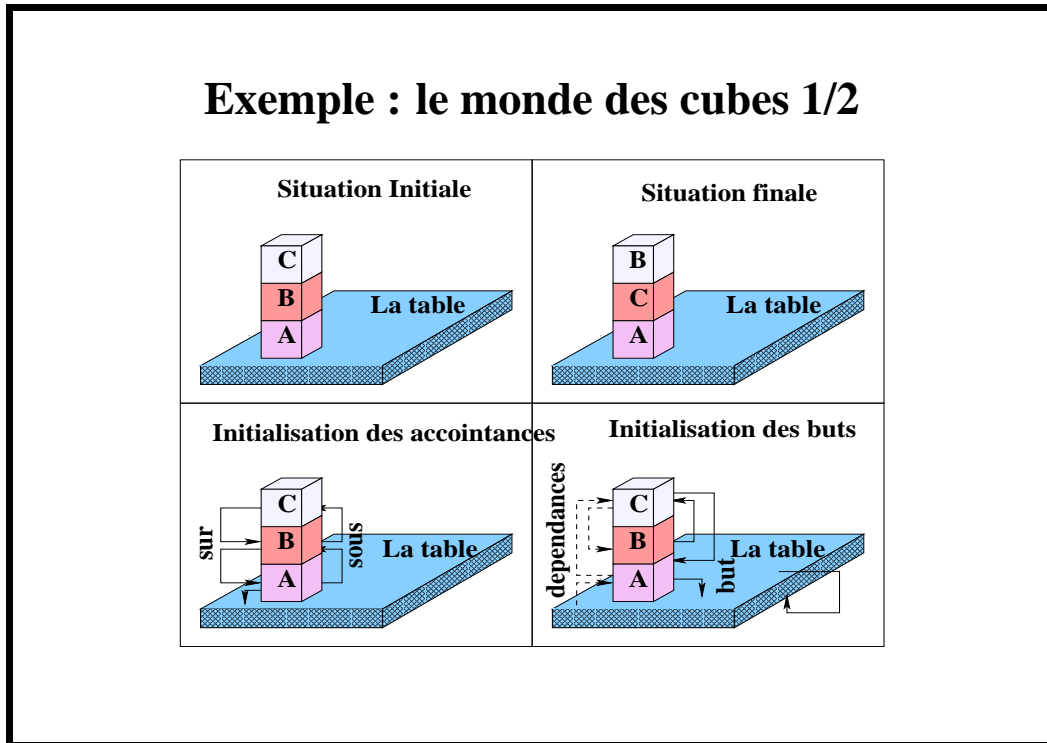
A. Cardon, C. Bertelle et D. Olivier - LIH

```
Entrée : x, y, c 3 agents
Appel : faireFuir(x, y, c)
DEBUT
  SI x était satisfait
    ALORS x n'est plus satisfait
  FSI
  p <- trouverPlacePourFuir(x, y, c)
  SI p = aucune
    ALORS Il n'y a pas de solution
  SINON
    POUR tous les agents z qui gênent x
      dans sa fuite vers p FAIRE
        faireFuir(z, x, p)
    FPOUR
```

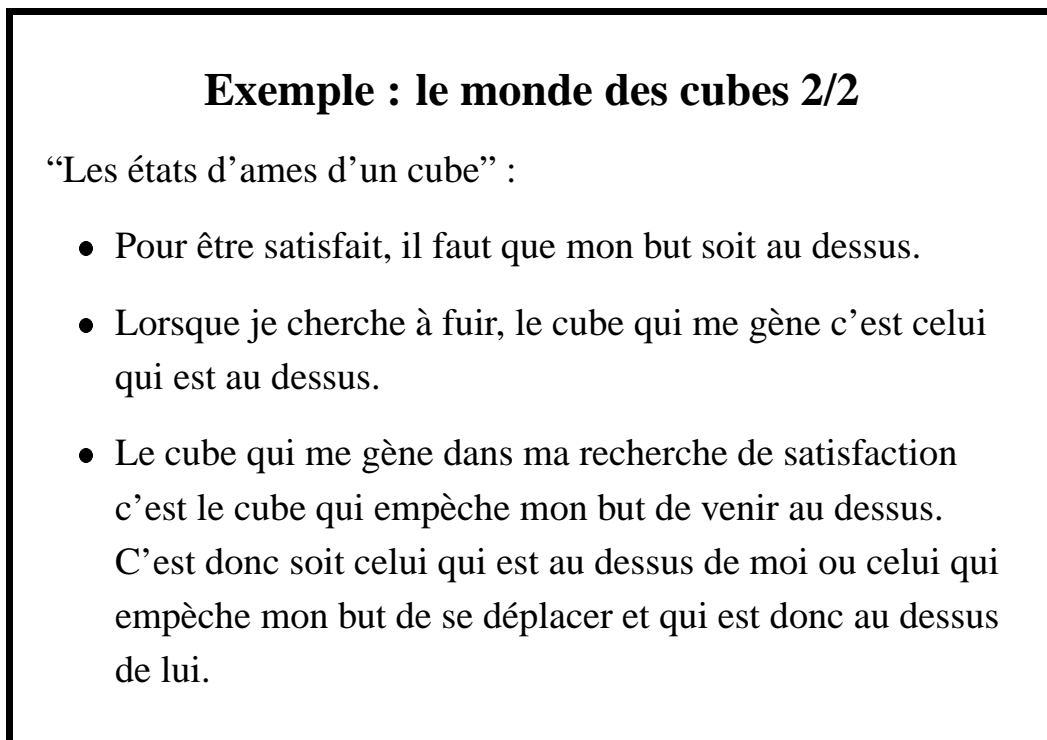
```
DES qu'il n'y a plus de gêneurs pour fuire
  ALORS faireFuite(x, p)
FDES
FSI
FIN
```

123- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

x fuis y avec la contrainte c . x doit donc rechercher une situation qui satisfasse c .
`trouverPlacePourFuir` cherche une place dans l'environnement.
`faireFuite` réalise effectivement l'action de fuite. Ces fonctions sont dépendantes de l'application.



124- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes



125- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

6.4.2 Le dilemme du prisonnier : modèle de coopération/compétition adaptative

Modèle d'aptitudes sociales

- Deux prisonniers + un juge
- Chaque prisonnier peut dénoncer (\bar{C}) ou non (C) son collègue
- Des remises de peine sont accordées suivant les cas

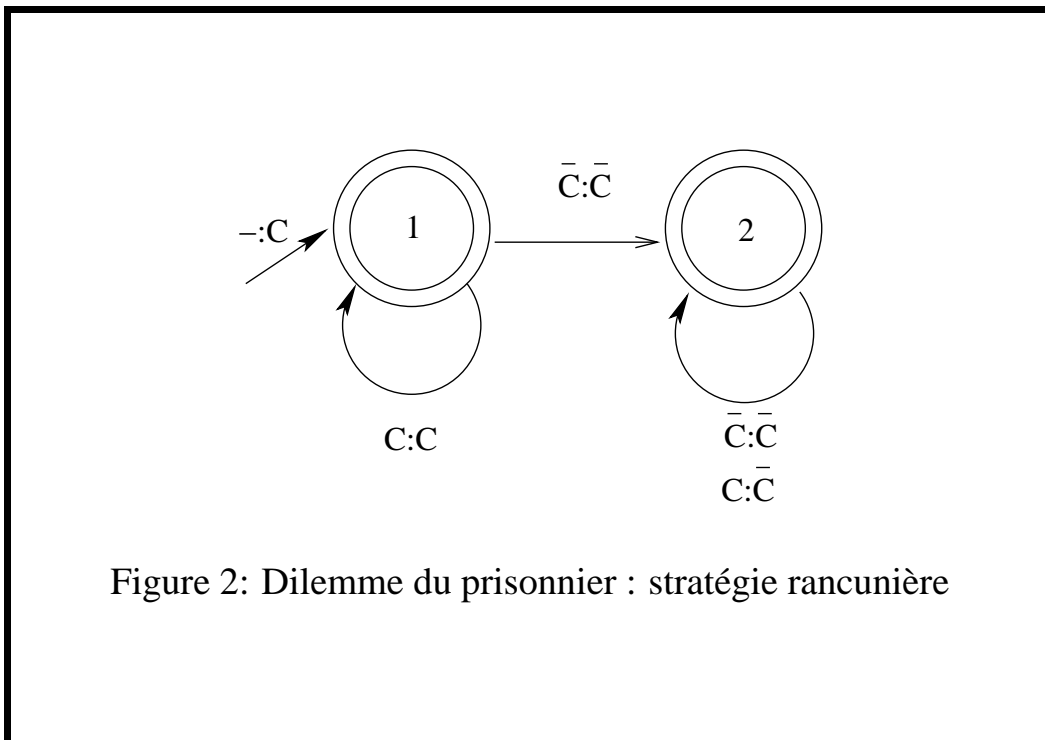
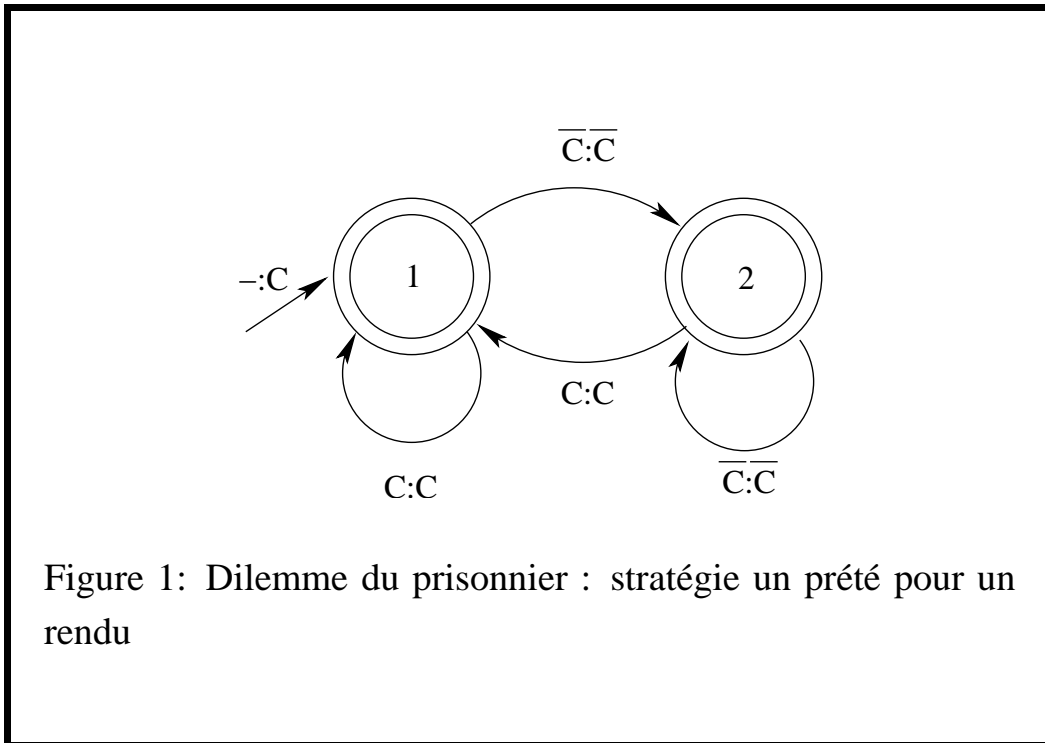
126- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes

	C	\bar{C}
C	(3,3)	(0,5)
\bar{C}	(5,0)	(1,1)

Table 1: Dilemme du prisonnier : remise de peine

- Version *itérée* du dilemme : chaque prisonnier mémorise le comportement de l'autre et met en œuvre une stratégie pouvant alterner des coopérations (non dénociations) ou des compétitions (dénociations).

127- DEA ITA - Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes



Dilemme du prisonnier : évolution du comportement par algorithme génétique

- Modélisation d'un comportement d'agent par un automate probabiliste.
- Exemple : stratégie probabiliste à deux états.

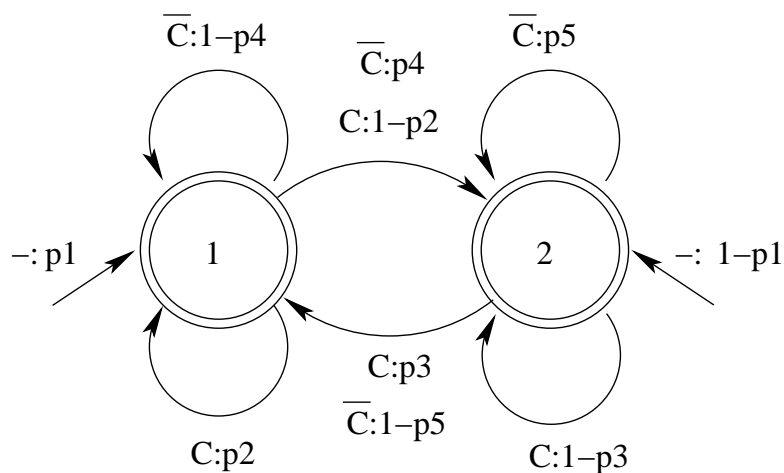


Figure 3: Automate probabiliste à deux états pour le dilemme du prisonnier

Des définitions

- Chemin réussi (entrée vers sortie) et son coût (produit des sorties).
- Fonction d'évaluation d'un agent : matrice des coûts des chemins réussis.
- Distance comportementale entre deux agents : norme matricielle de la différence de leur évaluation.
- Performance de l'agent par rapport à un groupe : proximité par rapport aux individus de ce groupe + une performance individuelle spécifique.

Opérateurs génétiques

- chromosomes = automates de comportement
- duplication
- croisement
- mutation

Algorithme à population constante

1. Pour tout couple d'agents : duplication, croisement, mutation
2. Calcul de performance des 4 agents
3. Sélection des 2 agents les plus performants qui vont représenter l'évolution des 2 agents initiaux

Effet de ce processus

- Emergence automatique d'un système organisé
- Système rétro-agissant sur ses éléments constitutifs grâce à l'algorithme génétique/évolutif

Validation et tests sur la recherche d'une stratégie adaptative pour le dilemme du prisonnier, face à un ensemble de stratégies fixes.

Le dilemme du prisonnier

Références bibliographiques

- R. Axelrod “ Effective Choice in the Prisoner’s Dilemma”, *Journal of Conflict Resolution*,**24**, pp 3-25, 1980.
- C. Bertelle, M. Flouret, V. Jay, D. Olivier et J.-L. Ponty “Genetic algorithms on automata with multiplicities for adaptive agent behaviour in emergent organization”, *SCI’2001*, Orlando, Florida (USA), July 2001.

- T. Bouron “Structures de communication et d’organisation pour la coopération dans un univers multi-agents”, *Thèse de l’Université Paris VI*, 1992.
- J.P. Delahaye et P. Mathieu “Expériences sur le dilemme itéré du prisonnier”, Laboratoire d’Informatique de Lille (Web accessible).
- V. Frebourg “Mise en œuvre de la représentation du comportement d’un agent”, *Rapport Interne LIH*, Université du Havre, 2001.