

## Intelligence Artificielle Distribuée Systèmes Multi-Agents



Guillaume Hutzler / Tarek Melliti  
IBISC (Informatique Biologie Intégrative et Systèmes Complexes)  
LIS (Langage Interaction et Simulation)  
prenom.nom@ibisc.univ-evry.fr  
<http://www.ibisc.univ-evry.fr/~hutzler/Cours/SMA.html>

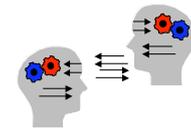
### Introduction

## Intelligence Artificielle Distribuée

L'IAD s'intéresse à des systèmes dans lesquels des **agents** artificiels opèrent **collectivement** et de façon **décentralisée** pour accomplir une tâche



Métaphore de l'IA :  
le penseur isolé

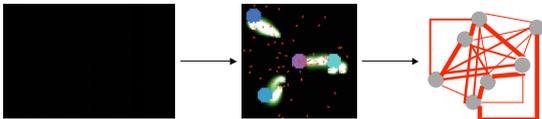


Métaphore de l'IAD :  
la communauté de penseurs

### Introduction

## Systèmes multi-agents : Problématique

- Deux objectifs majeurs [Ferber 95]
  - «l'analyse théorique et expérimentale des mécanismes d'auto-organisation qui ont lieu lorsque plusieurs entités autonomes interagissent»
  - «la réalisation d'artefacts **distribués** capables d'accomplir des tâches complexes par coopération et interaction»
- Deux approches complémentaires
  - modéliser et simuler des phénomènes naturels; construire des modèles d'(auto)-organisation
  - réaliser des systèmes informatiques complexes à partir de concepts d'**agent**, d'**interaction** et d'**organisation**



### Introduction - Agent

## Qu'est-ce qu'un agent?

[Wooldridge et Jennings 1995]

- Weak agency
  - hardware or software-based computer system that enjoys the following properties:
    - autonomy**: agents operate without the direct intervention of humans or others, and have some kind of control over their actions and internal state
    - social ability**: agents **interact** with other agents (and possibly humans) via some kind of **agent-communication language**
    - reactivity**: agents perceive their **environment**, (which may be the physical world, a user via a graphical user interface, a collection of other agents, the Internet, or perhaps all of these combined), and respond in a timely fashion to changes that occur in it;
    - pro-activeness**: agents do not simply act in response to their environment, they are able to exhibit **goal-directed behavior** by **taking the initiative**

### Introduction

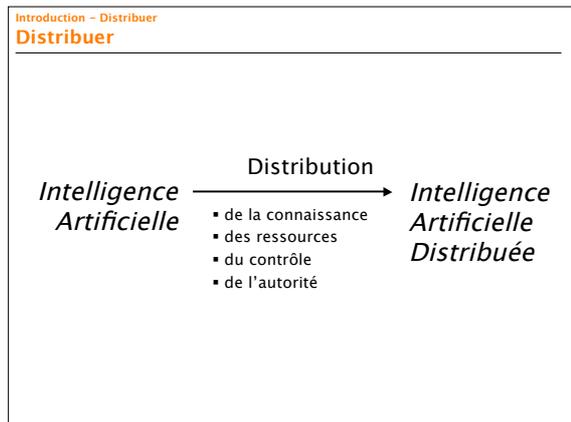
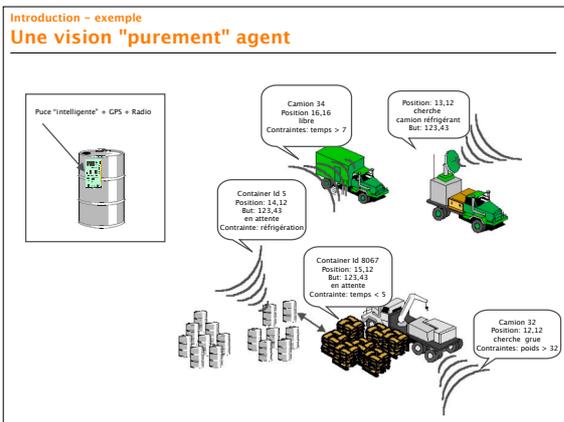
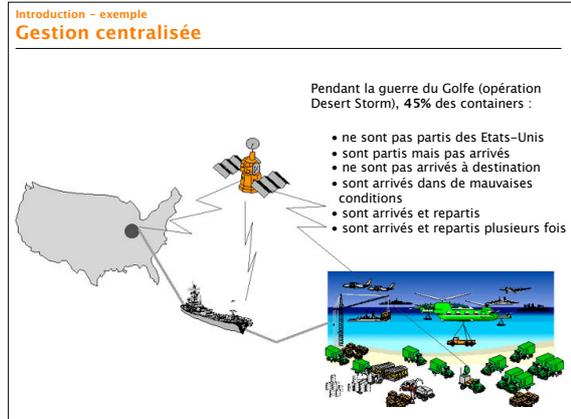
## Avertissement - Agent inside

- Un terme dangereux
  - un terme à la mode : utilisé pour désigner tout et n'importe quoi...
  - un terme connoté : anthropomorphisation
- Multiplicité de typologies d'agents
  - agents collaboratifs / apprenants / autonomes
  - agents d'interface / d'information / ...
  - agents mobiles / statiques
  - agents réactifs / délibératifs / hybrides
  - ...
- Multiplicité d'applications
  - télécommunication, contrôle, robotique, simulation, Internet, langage naturel, vision artificielle, ...

### Introduction

## Quelques types d'agents

- Agents rationnels
  - IA, comportement délibératif, croyances, buts, désirs, intentions
- Agents mobiles
  - minimisation des communications distantes
  - informatique nomade
- Agents assistants
  - secrétaire virtuel(le)
    - trie le mail
    - gère les rendez-vous
    - recherche des billets d'avion
  - <logiciel utilisateur + assistant>
    - compagnon Microsoft
  - agents "émotionnels"
- Agents logiciels
  - ex: démons Unix, virus informatique, robots Web
- Agents robotiques
  - robotique collective (ex: RoboCup, déminage, etc.)
- Agents de loisir
  - virtuels (ex: jeux vidéos)
  - virtuels physiques (ex: Tamagotchi)
  - physiques (ex: Furby, robot-chien Aibo Sony)



**Introduction – Distribuer**  
**1. Les problèmes peuvent être...**

- ... fonctionnellement distribués
  - ▶ la résolution du problème nécessite l'intervention d'experts aux compétences variées
- ... spatialement distribués
  - ▶ la résolution du problème nécessite l'intégration de données en provenance de sites géographiquement distincts
- ... complexes à appréhender de manière globale
  - ▶ la résolution doit opérer par composition de solutions élaborées de manière locale

*Deep Blue* → *Eco-résolution*

**Introduction – Problèmes fonctionnellement distribués**  
**Du système expert au tableau noir**

- Approche IA classique : métaphore du *penseur isolé*
  - ▶ test de Turing, systèmes experts, ...
  - ▶ focalisation sur les capacités cognitives individuelles
  - ▶ implantation sur une machine mono-processeur
- Problèmes :
  - ▶ « intelligence » coupée du monde
  - ▶ 1 seule ligne de raisonnement
  - ▶ pas de discussion avec d'autres

Introduction – Problèmes fonctionnellement distribués  
**La métaphore du tableau noir**

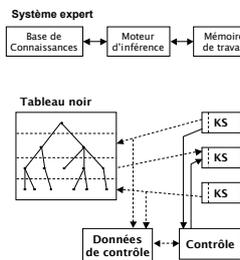
«Métaphoriquement, on peut penser à un ensemble de collaborateurs qui regardent tous le même tableau noir : chacun peut lire tout ce qui y est écrit, et juger quand il a quelque chose de pertinent à y ajouter.»

[Newell 62]



- Modèle de résolution de pb pour
  - organiser les connaissances
  - organiser l'utilisation des connaissances afin de construire une (des) solution(s)

Introduction – Problèmes fonctionnellement distribués  
**Le modèle du tableau noir**

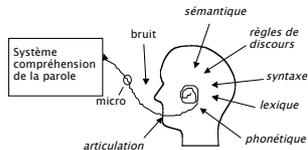


- une KS effectue des changements sur le blackboard; un enregistrement est conservé dans la structure de données qui contient l'information de contrôle
- chaque KS indique ce qu'il peut faire pour contribuer au nouvel état de la résolution
- un module de contrôle utilise les points 1 et 2 pour sélectionner le **focus attentionnel**
- en fonction de l'information contenue dans le focus attentionnel, le module de contrôle approprié prépare son exécution:
  - si le focus est une KS, on choisit un objet (ou un ensemble d'objets du blackboard) pour servir de contexte d'invocation
  - si le focus est un objet du blackboard, on choisit une KS pour traiter cet objet
  - si le focus est une KS et un objet, la KS est prête à être exécutée

Introduction – Problèmes fonctionnellement distribués  
**Hearsay-II**

Pb = intégrer des connaissances pour résoudre les pbs d'incertitude en reconnaissance de la parole

- interpréter de l'anglais parlé (vocabulaire limité) pour identifier une requête de base de données (résumés d'articles en IA)
- exemples
  - "Which abstracts refer to theory of computation?"
  - "What has McCarthy written since nineteen seventy-four?"



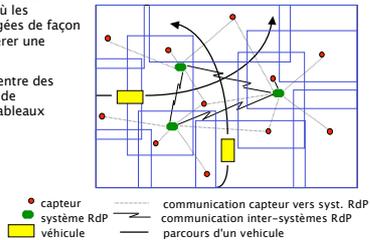
Introduction – Problèmes fonctionnellement distribués  
**Niveaux et sources de connaissance**

Niveaux	Sources de Connaissance
Interface Base de Donnée	(select Articles where authors contains "Turing")
Phrase	(any article by Turing)
Séquence de mots	(any) (article by) (Turing)
Mot	article by
Syllabe	har ar ti cle keul
Segment	[ar] [ti] [kel] [bai]
Signal	

Introduction – Problèmes physiquement distribués  
**Résolution répartie de problèmes distribués**

**DVMT (Distributed Vehicle Monitoring Testbed)**

- Repérage des mouvements de véhicules à partir d'un réseau de capteurs
- Accomplissement collectif d'une tâche d'interprétation où les informations sont agrégées de façon incrémentale pour générer une carte.
- Etude des interactions entre des systèmes de résolution de problèmes (réseau de tableaux noirs)



Introduction – Problèmes complexes à appréhender de manière globale  
**Eco-Résolution (Eco Problem Solving)**

- Chaque agent a
  - un **but** (un autre agent)
  - des **accointances** (d'autres agents)
  - des **dépendances** (d'autres agents)
  - des **généurs** (d'autres agents)
- Le modèle de comportement est un automate à états finis :
  - satisfait**: l'agent ne fait rien
  - rechercheSatisfaction**: l'agent cherche à se satisfaire
  - rechercheFuite**: l'agent a été agressé et tente de fuir
  - fuite**: l'agent fuit



## 2. Le matériel a évolué ...

- ... vers la connexion d'ordinateurs en réseaux
  - ▶ les connaissances et les services sont répartis sur le réseau
  - ▶ les utilisateurs du réseau doivent travailler ensemble
- ... vers des ordinateurs massivement parallèles
  - ▶ les processeurs doivent coordonner leur exécution pour produire un résultat
- ... vers des microprocesseurs à multiples unités de calcul
  - ▶ les unités de calcul doivent coordonner leur exécution
- ... vers la poussière intelligente, et les réseaux de capteurs
  - ▶ multitude d'unités de calcul très simples



Connection Machine

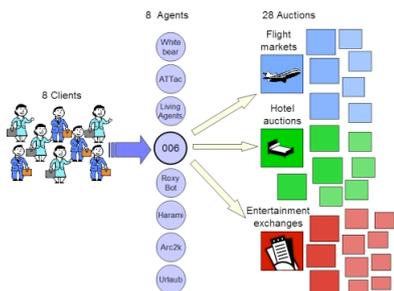
## Les langages d'acteurs

[Hewitt 77; Agha 79]

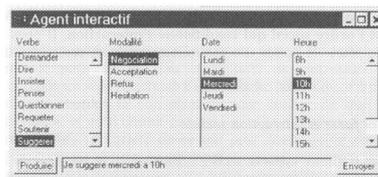
- Modèle de programmation concurrente
- Les structures de contrôle des langages traditionnels sont traduits sous forme de **schémas de communications** entre entités autonomes (acteurs).
- Les acteurs sont vus comme des spécialistes pouvant résoudre des problèmes en communiquant par envois de messages avec leurs **accointances**.
- Proche des "Beings" [Lenat 75], et des théories de l'esprit comme l'"écologie de l'esprit" [Bateson 79] ou "la société de l'esprit" [Minsky 88].

## L'agence de voyage

- Trading Agent Competition (TAC)



## L'agenda



- H1 : Vraiment, tu n'es pas disponible mercredi à 15h ? *INSISTER("mercredi a 15h")*
- S1 : Je te demande si tu peux mardi à 14h. *DEMANDER("mardi a 14h")*
- H2 : C'est pas super *AFFIRMER("hésitation")*
- S2 : Est-il possible de prendre rendez-vous mardi à 14h ? *REQUETER("mardi a 14h")*
- H3 : Cela ne m'arrange pas. *SUGGERER("négligence")*
- S3 : Vraiment, tu n'es pas disponible mardi à 14h ? *INSISTER("mardi a 14h")*
- H4 : Je pense que c'est bon mardi à 14h. *PENSER("accord")*

## 3. Systèmes logiciels complexes

- Les systèmes deviennent de plus en plus complexes
  - ▶ Développer des techniques modulaires de réalisation de programmes (composants "enfichables")
  - ▶ Développer l'autonomie des entités informatiques
  - ▶ Développer des "frameworks" d'intégration de ces entités
- Les systèmes sont de plus en plus distribués
  - ▶ Techniques permettant à des entités informatiques de "collaborer" à distance de manière simple et transparente

## La programmation a évolué ...

- ... vers plus de modularité
  - ▶ 1950 Langages machine et assembleur
  - ▶ 1960 Programmation procédurale
  - ▶ 1970 Programmation structurée
  - ▶ 1980 Programmation orientée-objet
  - ▶ 1990 Composants, Agents
  - ▶ 2000 Aspects
- ... vers plus d'autonomie
  - ▶ variables et fonctions
  - ▶ objets (encapsulation)
  - ▶ acteurs (objets + parallélisme)
  - ▶ agents (acteur + pro-activité)

### La programmation a évolué ...

- ... vers plus de distribution et d'hétérogénéité
  - ▶ multi-threads
  - ▶ sockets
  - ▶ RPC
  - ▶ Java RMI
  - ▶ CORBA
  - ▶ agents

Distribution /  
hétérogénéité  
↓

### 4. Les robots doivent intervenir ...

- ... en environnement incertain
  - ▶ les robots doivent devenir mobiles
  - ▶ les robots doivent décider de leurs actions de manière dynamique et autonome
- ... de manière collective
  - ▶ les robots doivent coordonner leurs actions
  - ▶ les robots doivent s'organiser collectivement afin d'effectuer la tâche demandée

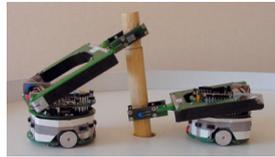
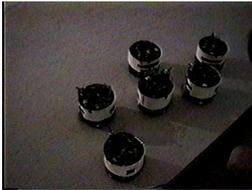


Sojourner



Robocup

### Coordination d'actions



### RoboCup



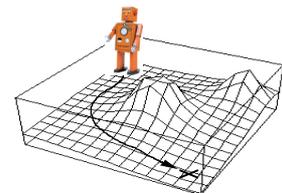
### RoboCup

- Construire des groupes de robots capables de jouer à un sport collectif (ressemblant au football)
- Représentatif des contraintes qui pèsent sur la conception de systèmes multi-agents
  - ▶ action & perception locales
  - ▶ pas de coordination globale
  - ▶ nécessité de coopération
- Confronte des techniques essentiellement logicielles à un environnement dynamique réel
  - ▶ Imperfection de la perception et de la communication
  - ▶ Incomplète de l'information
  - ▶ Hiatus entre intention (prévision) et action
  - ▶ Possibilités de pannes



### CRAASH: Navigation (1)

- Les forces s'appliquant sur un agent sont définies comme le gradient d'un champ de potentiel
 
$$F(p) = - \text{grad}(U(p))$$
- Les buts sont des champs attractifs
- Les obstacles des champs répulsifs
- Le mouvement d'un agent s'obtient par combinaison de ces forces



Introduction – La robotique  
**CRAASH: Navigation (2)**

- Dans le cas de plusieurs agents mobiles, chacun est considéré comme un **obstacle** pour les autres
- Mais les deux forces ne suffisent pas...

Introduction – La robotique  
**CRAASH: Navigation (3)**

- Ajout d'une force glissante, perpendiculaire à la force de répulsion, et dont la norme est fonction de la distance à conserver pour **contourner** l'obstacle.

Introduction – Distribuer  
**5. La simulation s'intéresse ...**

- ... aux systèmes complexes
  - ▶ besoin de tester les modèles et théories manipulées dans le domaine
  - ▶ besoin de représenter des niveaux différents
  - ▶ besoin de représenter les comportements des entités du système et pas seulement le résultat de ces comportements
  - ▶ besoin d'expliquer l'émergence de structures spatio-temporelles

[Lotka et Volterra 1926]

$$\begin{cases} N(0) = N_0 & P(0) = P_0 \\ \frac{dN}{dt} = aN - bNP \\ \frac{dP}{dt} = -cP + dNP \end{cases}$$

Introduction – La simulation  
**Lotka et Volterra**

$$\begin{cases} N(0) = N_0 & P(0) = P_0 \\ \frac{dN}{dt} = aN - bNP \\ \frac{dP}{dt} = -cP + dNP \end{cases}$$

Introduction – La simulation multi-agents  
**Simulation multi-agents (1)**

- Créer un monde artificiel composé d'agents en interaction
- Trois composantes
  - ▶ les agents
  - ▶ les règles de comportement
  - ▶ l'environnement
- Les agents agissent et modifient l'environnement
- On observe le résultats de leurs interactions comme si l'on était dans un laboratoire (notion de **laboratoire virtuel**)

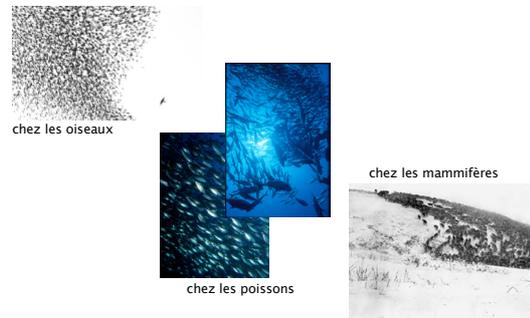
Introduction – La simulation multi-agents  
**Simulation multi-agent (2)**

- Etude des sociétés humaines et naturelles
  - ▶ Possibilité de modéliser de façon isomorphe les objets d'études des sciences humaines et naturelles
  - ▶ Possibilité de choisir le niveau d'analyse du domaine, ainsi que de combiner plusieurs types d'expertise
  - ▶ Possibilité de modéliser les comportements, pas seulement leur résultante
- Apports pour la réalisation de sociétés d'agents artificiels
  - ▶ Possibilité d'étudier des modes d'organisation, des méthodes de résolution collective de problème existant dans la réalité
  - ▶ Possibilité de découvrir de nouvelles analogies, de nouvelles métaphores, qui ne soient pas simplement des métaphores «de surface»
    - pas inépuisables
    - difficiles de les enrichir car souvent intuitives
    - difficiles à opérationnaliser

Introduction – La simulation multi-agents  
**Simulation multi-agent (3)**

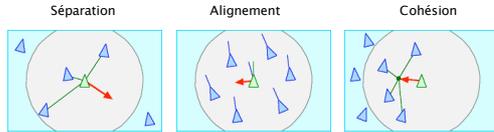
- **Autres dénominations**
  - ▶ Simulation individu-centrée (Individual Based Modelling)
  - ▶ Agent-based Modelling
  - ▶ Simulation comportementale (behavioural simulation)
  - ▶ Simulation corpusculaire (physique)

Introduction – La simulation multi-agent  
**Exemple – les comportements grégaires**

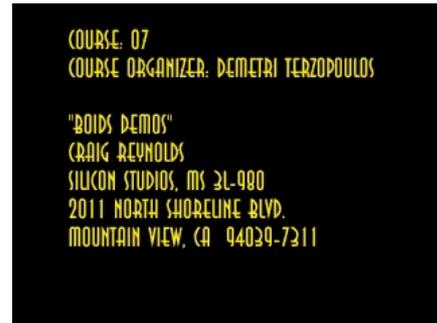


Introduction – La simulation multi-agent  
**Exemple – le modèle de flocking [C. Reynolds]**

- **modèle de déplacement animal de groupe (oiseaux, poissons, mammifères sociaux, etc.)**
  - ▶ représentation 3D
  - ▶ modèle de comportement basé sur 3 comportements simples qui décrivent les manœuvres à faire en fonction des voisins



Introduction – La simulation multi-agent  
**C. Reynolds – Boids**



Introduction – La simulation multi-agent  
**Application à l'animation**

- 1987: *Stanley and Stella in: Breaking the Ice*, (short) Director: Larry Malone, Producer: Symbolics, Inc.
- 1988: *Behave*, (short) Produced and directed by Rebecca Allen
- 1989: *The Little Death*, (short) Director: Matt Elson, Producer: Symbolics, Inc.
- 1992: *Batman Returns*, (feature) Director: Tim Burton, Producer: Warner Brothers.
- 1993: *Cliffhanger*, (feature) Director: Renny Harlin, Producer: Carolco Pictures.
- 1994: *The Lion King*, (feature) Director: Allers / Minkoff, Producer: Disney.
- 1996: *From Dusk Till Dawn*, (feature) Director: Robert Rodriguez, Producer: Miramax.
- 1996: *The Hunchback of Notre Dame*, (feature) Director: Trousdale / Wise, Producer: Disney.
- etc.



Introduction – La simulation multi-agent  
**Application à l'animation**



Le roi lion (© Disney)

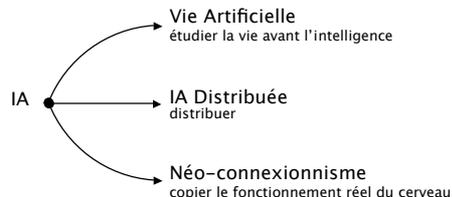
Introduction – La simulation multi-agent  
**Application à l'animation**

MASSIVE (Multiple Agent Simulation System in Virtual Environment)

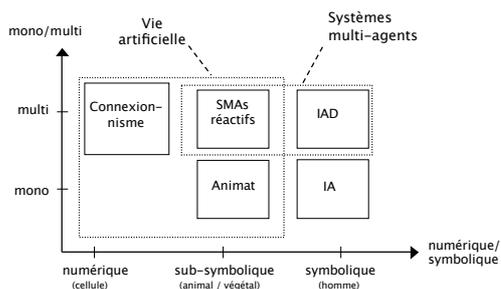


Introduction – De l'IA à l'IAD  
**L'Intelligence Artificielle a éclaté**

Dans les années 80...



Introduction – De l'IA à l'IAD  
**Dimensions d'analyse**



Introduction  
**Le passage à la métaphore sociale**

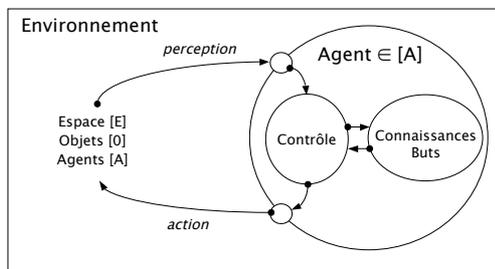
- Les entités intervenant dans la résolution d'un problème sont chargées de résoudre le problème de leur **organisation**
  - il faut leur donner les moyens nécessaires pour le faire
  - on leur confère ainsi une **autonomie**
- On est passé de **contrôler des modules** à **donner à des agents les moyens de s'organiser**
- On va parler de « systèmes multi-agents » dans lesquels les agents devront interagir pour
  - coopérer (*contrôle*)
  - collaborer (*allocation de tâches*)
  - négoier (*résolution de conflits*)
  - se coordonner (*synchronisation*)

Introduction – Agent  
**Qu'est-ce qu'un agent?**

[Wooldridge et Jennings 1995]

- Weak agency**  
 hardware or software-based computer system that enjoys the following properties:
  - autonomy**: agents operate without the direct intervention of humans or others, and have some kind of control over their actions and internal state
  - social ability**: agents **interact** with other agents (and possibly humans) via some kind of *agent-communication language*
  - reactivity**: agents perceive their **environment**, (which may be the physical world, a user via a graphical user interface, a collection of other agents, the Internet, or perhaps all of these combined), and respond in a timely fashion to changes that occur in it;
  - pro-activeness**: agents do not simply act in response to their environment, they are able to exhibit **goal-directed behavior** by *taking the initiative*

Introduction – Agent  
**Architecture générique**



## Système multi-agents

Un SMA est défini comme:

- Un ensemble **B** d'entités plongées dans un environnement **E** (E est caractérisé par l'ensemble des états de l'environnement S)
- Un ensemble **A** d'agents avec  $A \subseteq B$
- Un système d'action (opérations) permettant à ces agents d'agir dans E (une opération est une fonction de  $S \Rightarrow S$ )
- Un système de communication entre Agents (envoi de messages, diffusion de signaux,...)(I comme interaction)
- Une organisation **O** structurant l'ensemble des agents et définissant les fonctions remplies par les agents (notion de rôle et éventuellement de groupes)
- Eventuellement: une relation à des utilisateurs **U** qui agissent dans ce SMA via des agents interfaces  $U \subseteq A$

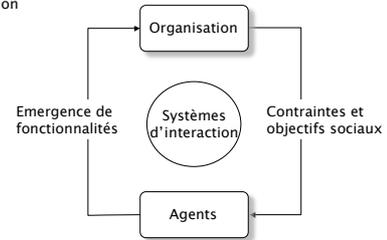
(modèle **Voyelles** d'Yves Demazeau)

Introduction – Systèmes multi-agents

## Lien micro/macro

Trois niveaux d'analyse

- ▶ l'agent
- ▶ l'interaction
- ▶ l'organisation



d'après [Ferber 95]

Introduction – Concepts multi-agents

## Problèmes liés aux SMA

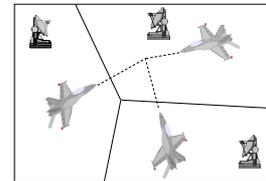
- **Décomposition**
  - ▶ décomposition du problème à résoudre en agents (réification)
  - ▶ allocation dynamique des tâches
- **Agent**
  - ▶ choix d'une architecture appropriée
  - ▶ choix de comportements
- **Interaction – coopération**
  - ▶ communication
  - ▶ coopération
    - collaboration – allocation de tâches
    - coordination d'actions
  - ▶ résolution de conflits et négociation
- **Organisation**
  - ▶ structure de la société d'agent
  - ▶ transformation dynamique des relations «sociales» entre agents

Introduction – Problèmes liés aux SMA

## Le choix d'une décomposition

Etant donné un pb à résoudre, comment choisir les agents qui vont intervenir dans le système et comment leur répartir la compétence?

- ▶ Grand nombre de décompositions possibles
  - objet
  - spatiale
  - fonctionnelle
  - etc.
- ▶ Différents grains possibles
  - société
  - individu
  - organe
  - cellule
  - atome
  - ...



Introduction – Problèmes liés aux SMA

## Le choix d'un modèle d'agent

- **Agents cognitifs – Intelligence Artificielle Distribuée**
  - ▶ agent = métaphore psychologique
    - connaissance décrite en termes d'états mentaux
    - comportement intentionnel (buts et plans explicites)
  - ▶ système = métaphore sociologique
- **Agents réactifs – Vie Artificielle**
  - ▶ agent = métaphore animale
    - connaissances réduites à l'association de stimuli et de réponses
    - comportement dirigé par les perceptions
  - ▶ système = métaphore socio-biologique

Introduction – Problèmes liés aux SMA

## Le choix d'un modèle de communication

- **Environnement**
  - ▶ perception / action (ex: consommation de ressources)
  - ▶ traces (ex: phéromones)
- **Symbolique (messages)**
  - ▶ médium (réseau, voix, vision)
  - ▶ participants
    - individuel – point à point
    - partagé – multicast
    - global – broadcast
    - publish / subscribe (événements)
- **Actes de langage**
  - ▶ "dire c'est faire": des phrases ne sont pas vraies ou fausses, elles constituent des actions de langage
  - ▶ La communication est pragmatique
    - elle explique généralement ce qui est accompli plus que ce à quoi cela se réfère
    - demander de faire quelque chose est une manière d'atteindre un but

### Le choix de techniques de coordination

- **Motivations**
  - ▶ capacités individuelles insuffisantes (ex: charges trop lourdes à transporter)
  - ▶ cohérence (réguler les conflits sémantiques: buts contradictoires, accès aux ressources...)
  - ▶ efficacité, traitement de l'incertain
  - ▶ recombinaison des résultats – solutions partielles
- **Techniques**
  - ▶ planification centralisée, semi-centralisée (synchronisation de plans individuels), décentralisée
  - ▶ synchronisation d'accès aux ressources
    - algorithmique répartie
    - règles sociales
  - ▶ négociation
    - numérique, symbolique (agrégation, argumentation), démocratique (vote, arbitrage), utilitarisme (théorie des jeux)
  - ▶ sans communication explicite
    - environnement, reconnaissance d'intentions

### Le choix d'un modèle d'organisation

- **3 points de vue**
  - ▶ organisations rationnelles
    - collectivités à finalités spécifiques
    - objectifs, rôles, relations (dépendances...), règles
  - ▶ organisations naturelles (végétatives)
    - objectif en lui-même : survie (perpétuer l'organisation)
    - stabilité, adaptativité
  - ▶ systèmes ouverts
    - inter-relations / dépendances avec d'autres organisations, environnement(s)
    - échanges, coalitions
- **Organisations abstraites**
  - ▶ rôles (client, producteur, médiateur)
  - ▶ spécialisation des agents (simplicité vs flexibilité)
  - ▶ redondance des agents (efficacité vs robustesse)
  - ▶ relations (dépendances, hiérarchie, subordination, délégation)
  - ▶ protocoles d'interaction / coordination
  - ▶ gestion des ressources partagées