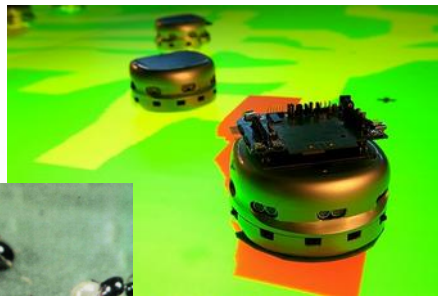


CentraleSupélec

Mineure, 3^{ème} année

Vie artificielle

Intelligence en essaim, automates cellulaires & SMA réactifs



Alexis Scheuer & Olivier Simonin

Maître de conférences UL (FST) / Loria

Plan

I. Introduction à l'intelligence en essaim

II. Automates cellulaires

III. Comportements réactifs

Braitenberg, champs de force, à base de comportements

IV. Systèmes Multi-Agent réactifs

Agent, système & simulation

V. Résolution collective de problème

- Résolution par coordination spatiale
- Résolution par marquage de l'environnement
- Un paradigme général ?

Vie artificielle ?

= robotique ?

Plusieurs majeures sur le sujet :

- Apprentissage (x 2),
- robotique médicale,
- robotique autonome,
- ...



Sujet(s) abordé(s) ?

- **Corps du robot** → contraintes imposées au mouvement
- Définition d'un comportement intelligent (I. A.)
- Méthodes considérées différentes de celles abordées en majeure R. A.

Objectif ?

**Remplacer / assister l'humain
dans des tâches désagréables / dangereuses
(répétitions, conditions extrêmes, ...)**

- Industrie (chaîne de production)
- Espace, fonds marins
- Maison (robots domestiques)
- Incendies, accidents nucléaires, ...

Du vivant à l'être artificiel ...

Fantasma de l'être artificiel : le robot

- Littérature : Héphestos, golem, Frankenstein, etc
- Le syndrome Terminator

Réalisations

- Mécanique : les automates (canard de Vaucanson, etc)
- Électronique : industrie, puis androïdes (~ 2000)

L'intelligence, c'est quoi ?

- L'intelligence humaine, son cerveau
- Le super ordinateur HAL (2001, l'odyssée de l'espace)
- La capacité d'adaptation aux perturbations (le vivant)
- Des réponses différentes en biologie, en psychologie, en informatique, en philosophie, ...



Actroid-DER 2005

Intelligence artificielle : pas encore au point !

- Symbolique : manipulation de concepts
- Automatique : réaction optimale
- Réseaux de neurones : apprentissage
- Théorie des jeux : optimisation probabiliste
- Sciences humaines : pression sociale
- Processus quantiques : pratique balbutiante
- ...

Imiter le vivant ...

l'intelligence en essaim (IE)



Une fonction complexe est réalisée par une population d'individus simples

Phénomène présent dans la nature : particules, cellules, insectes sociaux, animaux, etc
[Deneubourg 86] [Reynolds 87] [Brooks 90] [Bonabeau 94] [Steels 94] ...

Un paradigme pour l'IA ...

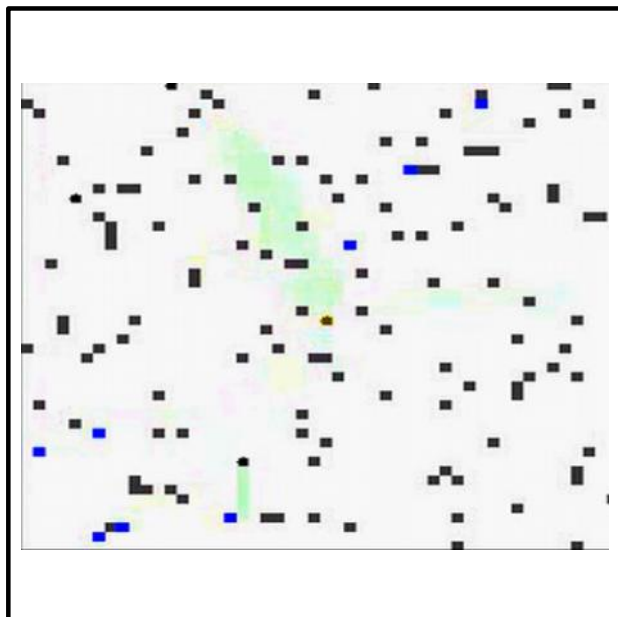
et la robotique



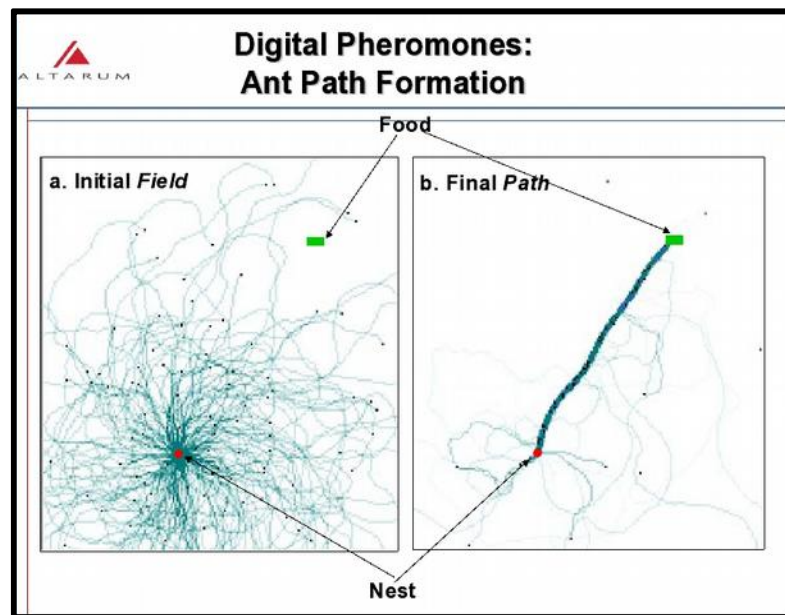
La fonction est réalisée par un grand nombre d'entités simples en interactions, sans qu'elle soit explicitement codées dans les entités

Illustration : Tâche de foraging (fourmis)

Problème du foraging : recherche et transport de ressources



[Theraulaz, Deneubourg 94]



[Parunak 97]

L'IE, une approche sub-symbolique

≠ IA symbolique, neuronale, évolutionnaire, cognitive

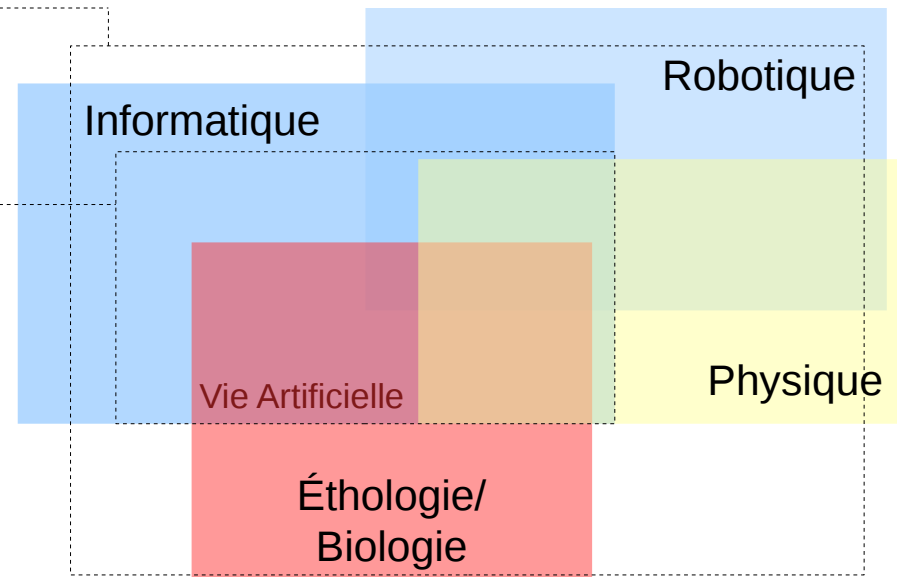
- vision non anthropomorphique mais **bio-inspirée**
- vision non mono-agent

Une approche bio-inspirée et pluridisciplinaire

- systèmes complexes
- systèmes multi-agents

Production de (méta-)heuristiques

- ACO Ant Colony Optimization [Dorigo 96] (phéromones)
- PSO Particule Swarm Optimization [Kennedy, Eberhart 95] (Flocking)



Simuler le vivant = vie artificielle

- Automates Cellulaires
- Évolution artificielle (algorithmes génétiques)
- Réseaux de neurones
- Simulation multi-agent (ou individu centrée)
- Robotique collective

C.G Langton 1992 Artificial Life

« Artificial Life: Life made by Man rather than by Nature. »

Mineure « Vie Artificielle », 3a

J. Fix

A. Scheuer (5 x)

H. Frezza

5 séances : 2 CM & 3 TP

- **CM 1** : introduction aux SMA réactifs
- **TP 1** : comportement réactif (Braitenberg)
- **CM 2** : résolution de problèmes par SMAr
- **TP 2** : déplacement de robots en essaim
- **TP 3** : recherche collective de ressources

CM 1 : introduction aux SMA réactifs



Ve 17 / 01, 14 h – 17 h 15, B 208

I. Introduction à l'intelligence en essaim

II. Automates cellulaires

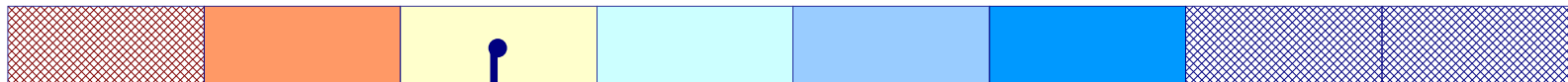
III. Comportements réactifs

Braitenberg, champs de force / potentiels,
à base de comportements

IV. Systèmes Multi-Agent réactifs

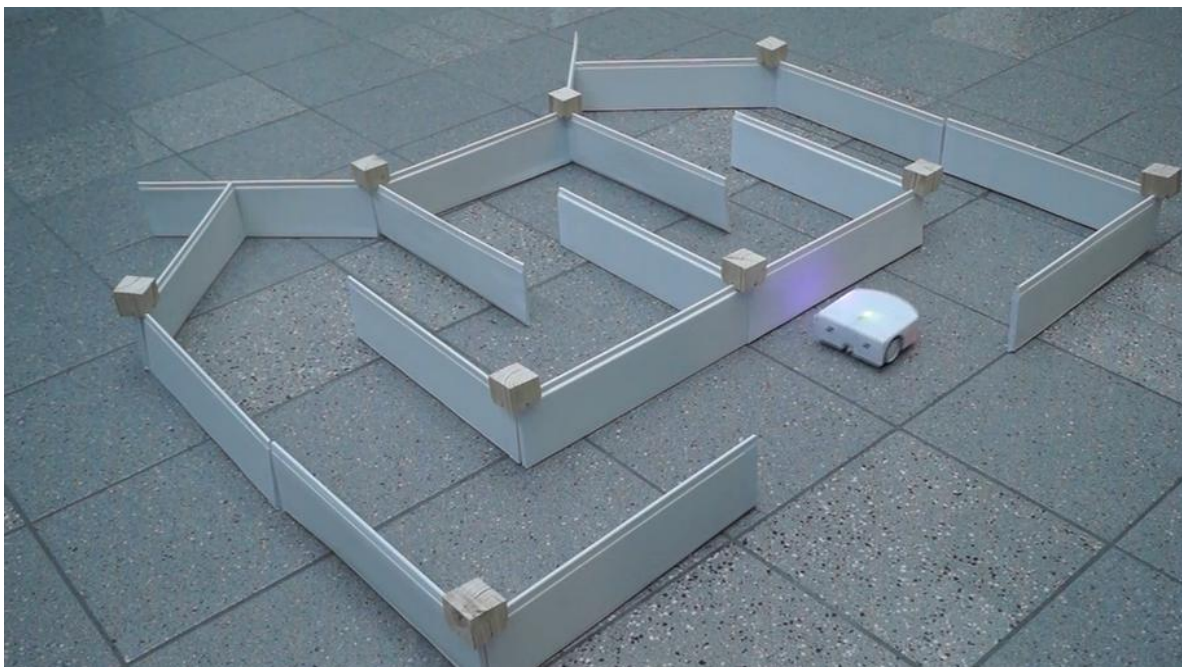
- Simulation multi-agent
- Un paradigme de résolution de problème ?

TP 1 : Braitenberg (robot réactif)

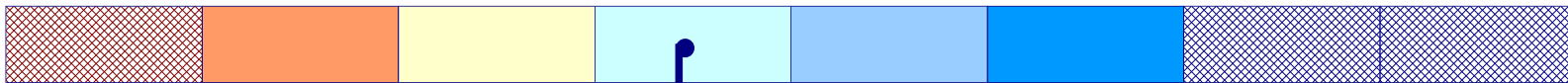


Ve 24 / 01, 14 h – 17 h 15, salle du conseil

Thymio 2, logiciel [Aseba](#), comportement réactif



CM 2 : résolution de problèmes par SMAr

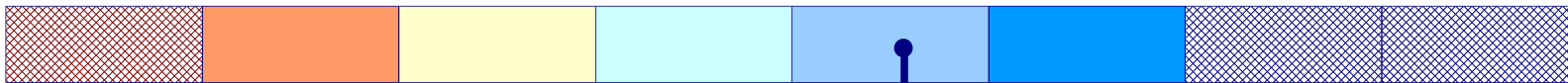


Ve 31 / 01, 14 h – 17 h 15

V. Résolution collective de problèmes

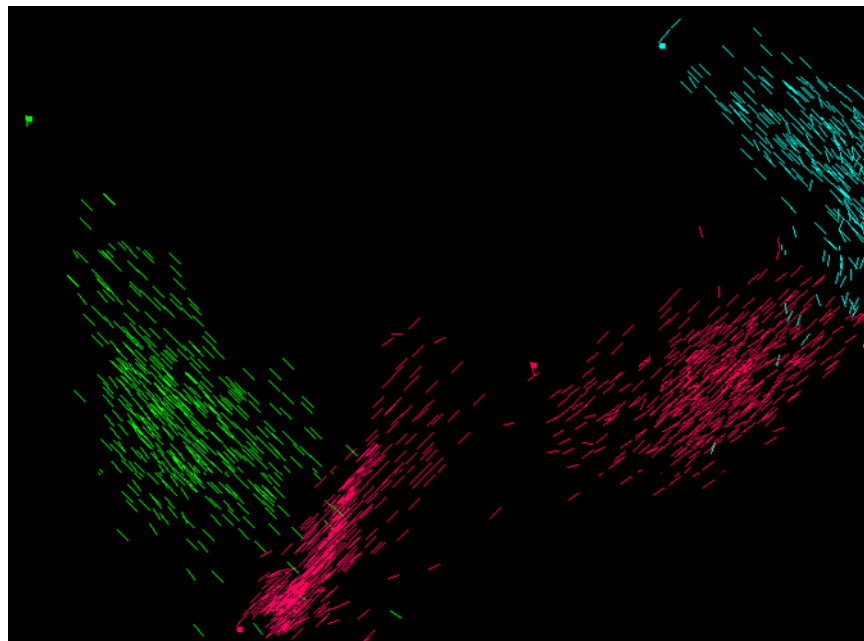
- Résolution par coordination spatiale
déplacement en essaim, convois,
optimisation spatiale
- Résolution par marquage
de l'environnement
modèle satisfaction / altruisme,
recherche de ressources, patrouille

TP 2 : déplacement de robots en essaim

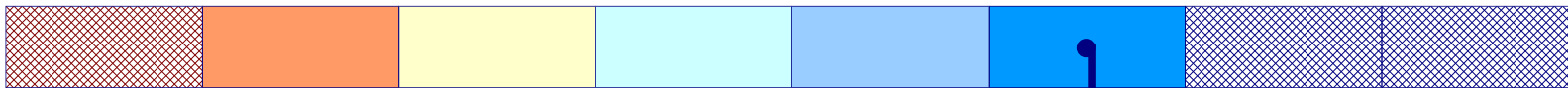


Ve 07 / 02, 14 h – 17 h 15

MadKit / TurtleKit
(simulation, Java),
comportement
réactif,
groupes de robots

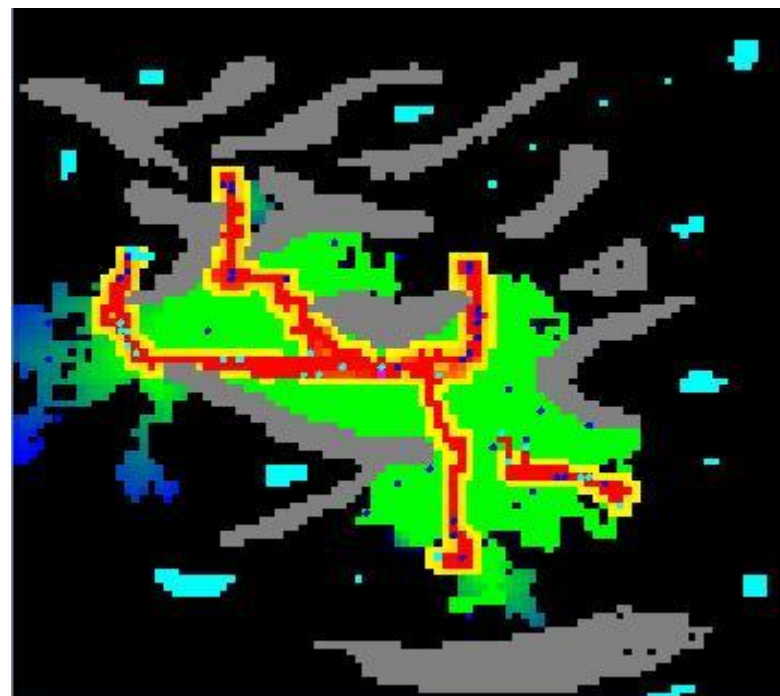


TP 3 : recherche collective de ressources



Ve 14 / 02, 14 h – 17 h 30

Simulation (Java),
comportement réactif
(exploration /
transport),
groupe de robots



Plan

I. Introduction à l'intelligence en essaim

II. Automates cellulaires

III. Comportements réactifs

Braitenberg, champs de force, à base de comportements

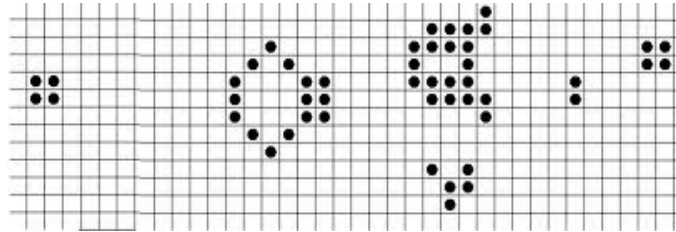
IV. Systèmes Multi-Agent réactifs

Agent, système & simulation

V. Résolution collective de problème

- Résolution par coordination spatiale
- Résolution par marquage de l'environnement
- Un paradigme général ?

Automates cellulaires, principes

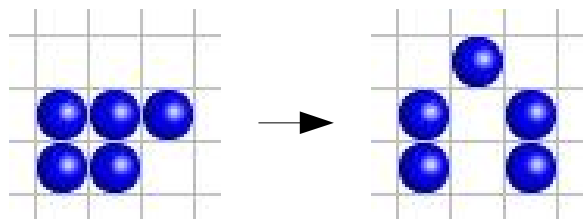
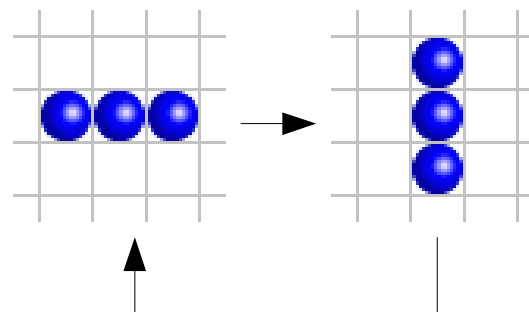
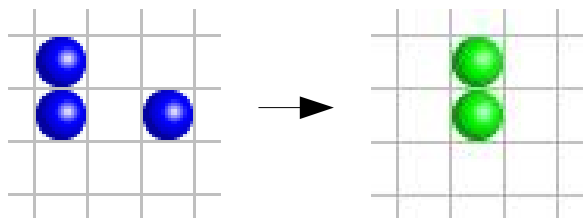


- John von Neumann 1940
 - AC : un ensemble de cellules dont l'état évolue selon des règles pré-établies
 - règle : le nouvel état dépend de l'état des cellules voisines
- John Conway : jeu de la vie 1970
 - Grille à 2 dimensions (∞)
 - État cellule = 1 / 0 (vivant/mort), voisinage 8-connexe
 - 2 règles :
 - une cellule morte possédant 3 voisines vivantes devient vivante (elle naît)
 - une cellule vivante possédant 2 ou 3 voisines vivantes le reste, sinon elle meurt

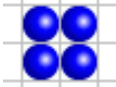
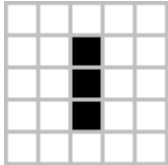

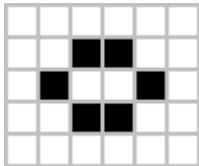
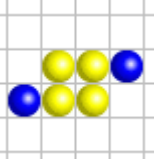
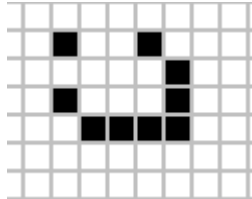
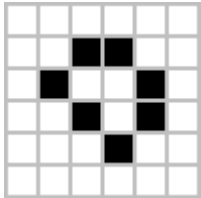
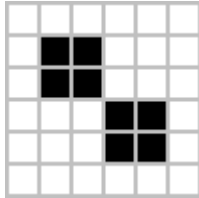
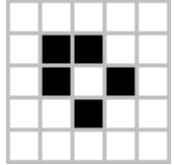
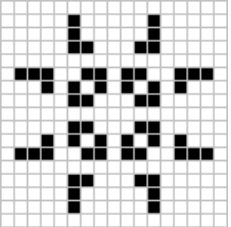
Jeu de la vie

➤ Règles :

- une cellule morte possédant 3 voisines vivantes devient vivante (elle naît)
- une cellule vivante possédant 2 ou 3 voisines vivantes le reste, sinon elle meurt



Jeu de la vie : structures

Stables	Oscillateurs	Vaisseaux
<p>Bloc</p> 	<p>Clignotant</p> 	<p>Planeur</p> 
<p>Ruche</p> 	<p>Grenouille</p> 	<p>Navette</p> 
<p>Pain</p> 	<p>Phare</p> 	
<p>Bateau</p> 	<p>Pulsar</p> 	

The Game of Life (wikipedia), le jeu de la vie (wikipédia),
<http://www.rennard.org/iva/acapll.html>

Automate cellulaire : formalisme

- Un AC est un 4-uplet (d, Q, V, δ) où
 - d est la dimension de l'automate, l'espace discret de dimension d
 - Q , un ensemble fini d'états possible pour chaque cellule (son alphabet)
 - V est son voisinage
 - $\delta : Q^{|V|} \rightarrow Q$ est la fonction de transition
- Exécution (en général) synchrone sur toutes les cellules

Automate cellulaire : questions théoriques

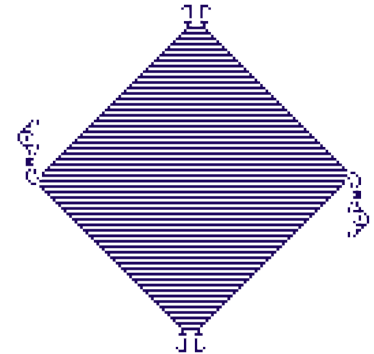
- Un AC est-il **Turing Universel** ?
 - Capacité à simuler toute machine de Turing
 - C'est le cas du Jeu de la Vie, et d'autres automates
- Étude du comportement :
 - **Classification des AC** (Wolfram 84)

4 classes d'évolution : état homogène, structures stables ou périodiques, comportement chaotique (apériodique), *structures complexes*
 - Quelle est sa robustesse à l'asynchronisme ? Aux perturbations ?
- Que peut-on prouver sur un AC ?

(+ loin !..)

Automate cellulaire : les limites ?

- Peut-on créer n'importe quelle **configuration** ?
 - Peut-on créer une configuration qui se répand petit à petit sur tout le plan avec une densité positive ?
 - Peut-on créer une configuration dont le nombre de cellules augmente plus vite que le temps
- Outil adapté à la **simulation** des éco-systèmes ?
 - des populations ?
 - de l'intelligence en essaim ?



Cf. [Spicher, Fates, Simonin 09]

Automate cellulaire : références

- Intro : http://t0m.free.fr/jdlv/jdlv_vivant.htm
- Robustesse des AC : Thèse de Nazim Fates (2002)
- <http://www.renard.org/iva/acapl.html> (Applet)
- Wolfram
 - Wolfram S., Universality and complexity in cellular automata, Physica D, 10:1-35, 1984
 - Wolfram S., A new kind of science, 2002

Plan

I. Introduction à l'intelligence en essaim

II. Automates cellulaires

III. Comportements réactifs

Braitenberg, champs de force, à base de comportements

IV. Systèmes Multi-Agent réactifs

Agent, système & simulation

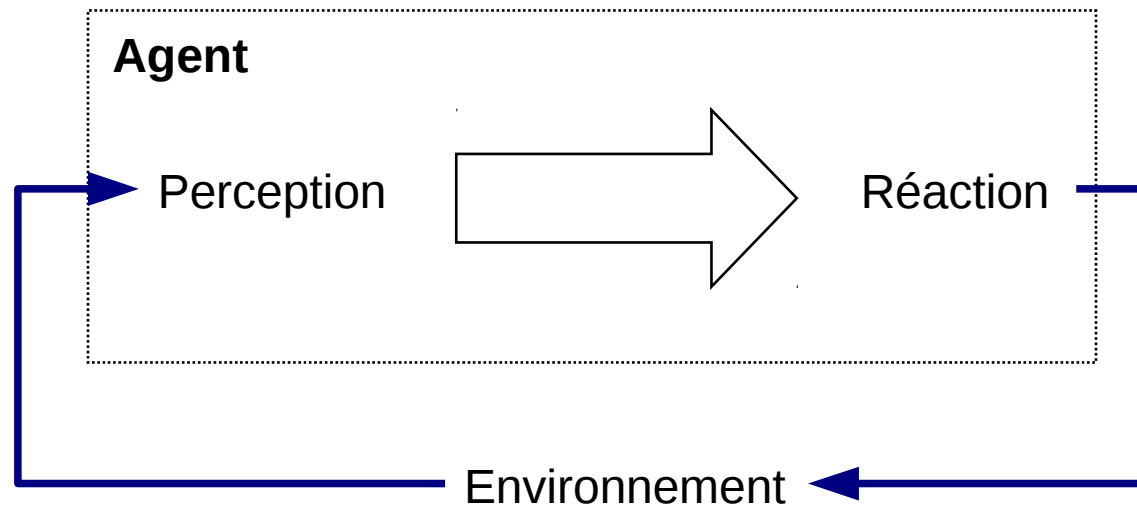
V. Résolution collective de problème

- Résolution par coordination spatiale
- Résolution par marquage de l'environnement
- Un paradigme général ?

Qu'est-ce qu'un agent / robot réactif ?

Agent = entité autonome proactive (Ferber 95).

Agent/robot **réactif** = agent qui possède un mécanisme de **réaction directement connecté à ses perceptions**, ne prenant en compte ni une explication des buts, ni des mécanismes de planification.



Le véhicule de Braitenberg [84]

Connexion excitatrices ou inhibitrices
entre les photorécepteurs et les moteurs

- comportements réalisables : aller vers la lumière, fuir la lumière, suivre un mur, éviter les obstacles
- le robot dispose d'un seul comportement

$$V_l = F(\text{intensity_percept_r})$$

$$V_r = F(\text{intensity_percept_l})$$

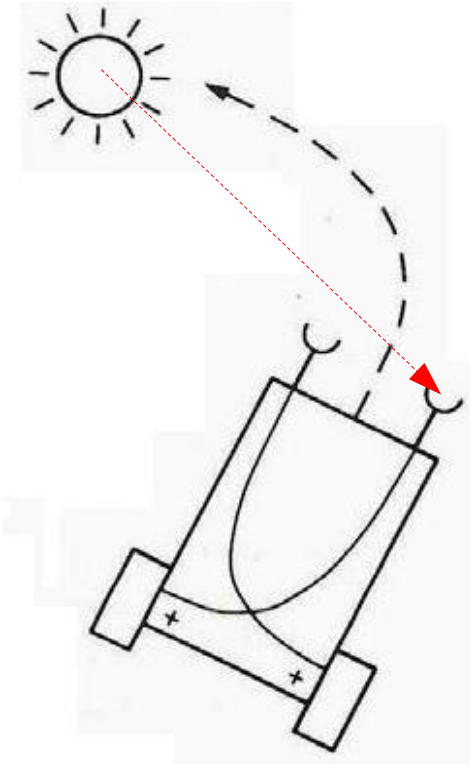
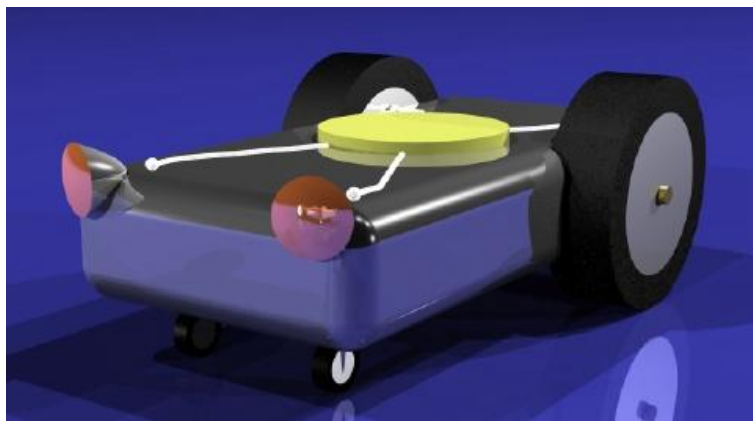
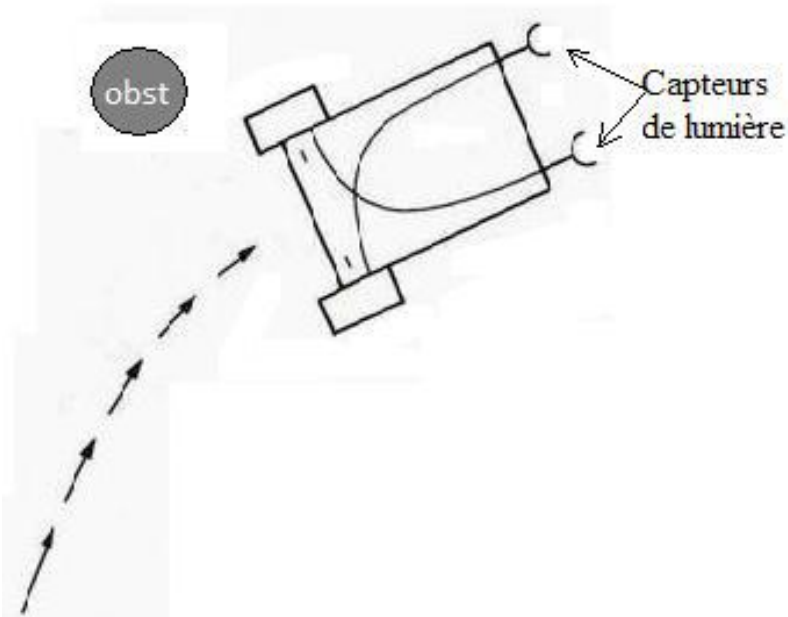


Illustration : véhicule de Braitenberg



Approche de Braitenberg : évitement d'obstacle



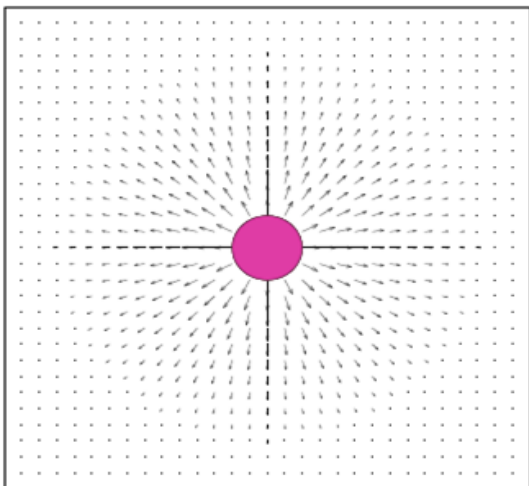
L'évitement est réalisé en baissant la vitesse de la roue opposée à l'obstacle (recevant le moins de lumière réfléchié)

Avec une ceinture de capteurs il faut généraliser avec une combinaison linéaire de l'ensemble des perceptions
→ TP à la prochaine séance..

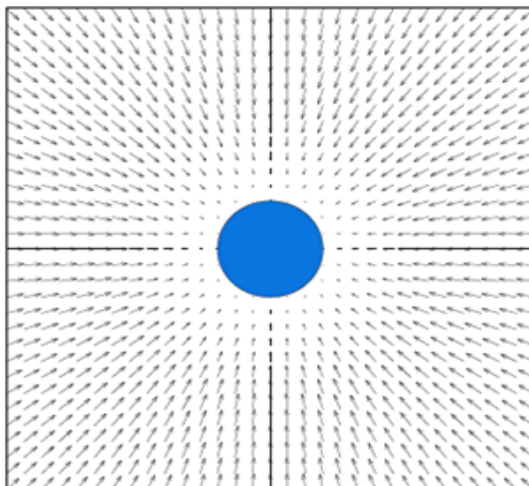


Champ de forces

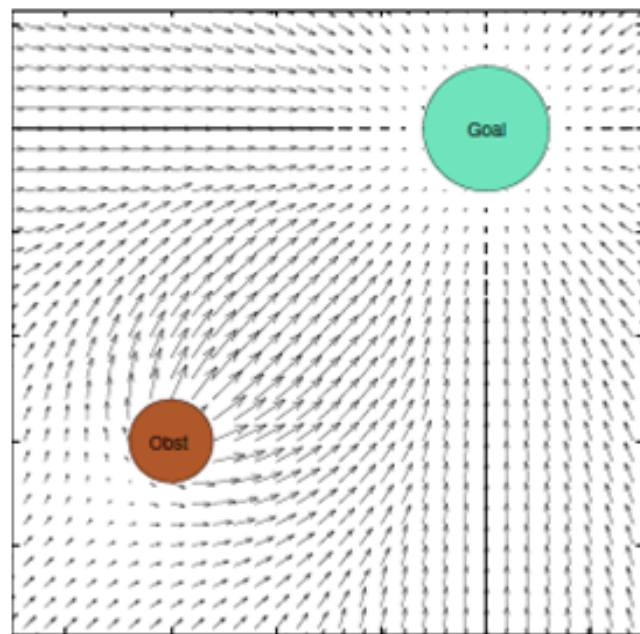
O. Khatib 86, R.C. Arkin 89..



obstacle



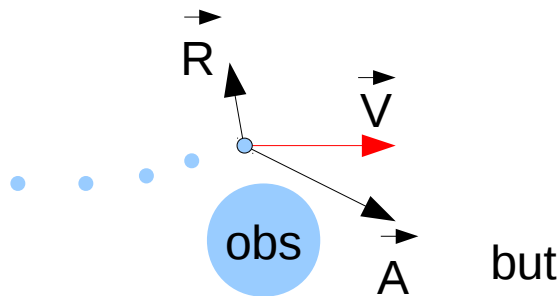
attracteur



combinaison

Champ de forces : principes

L'agent/robot est considéré comme une particule soumise à un champ de forces (issues d'une attraction et de répulsions)



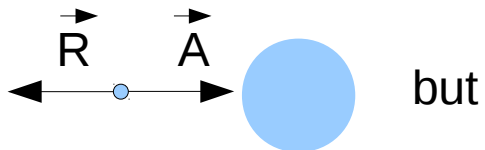
$$\vec{A} = K_{att} \cdot \vec{u}_{but}$$

$$\vec{R} = \left(\frac{1}{d(obs)} - \frac{1}{d_0} \right) \cdot \vec{u}_{obs} \quad \text{si } d(obs) < d_0$$

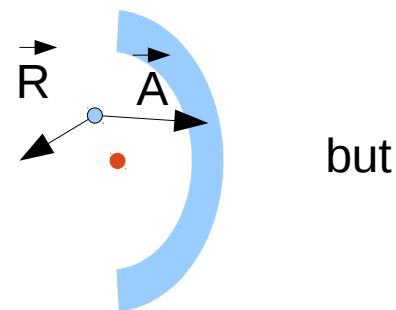
$$= 0 \quad \text{sinon}$$

Forme générale : $\vec{V} = \vec{A} + \sum_i \vec{R}_i$

Limites de la combinaison vectorielle



Problème quand $\vec{A} + \vec{R} = \vec{0}$



Pb. avec forme concave en général

Champ de potentiels (extension)

Les forces considérés précédemment peuvent être issues du **gradient** d'un **champ scalaire**.

Dans l'exemple précédent, on considère un polynôme de la **distance** à l'attracteur et de l'inverse de celle aux obstacles.

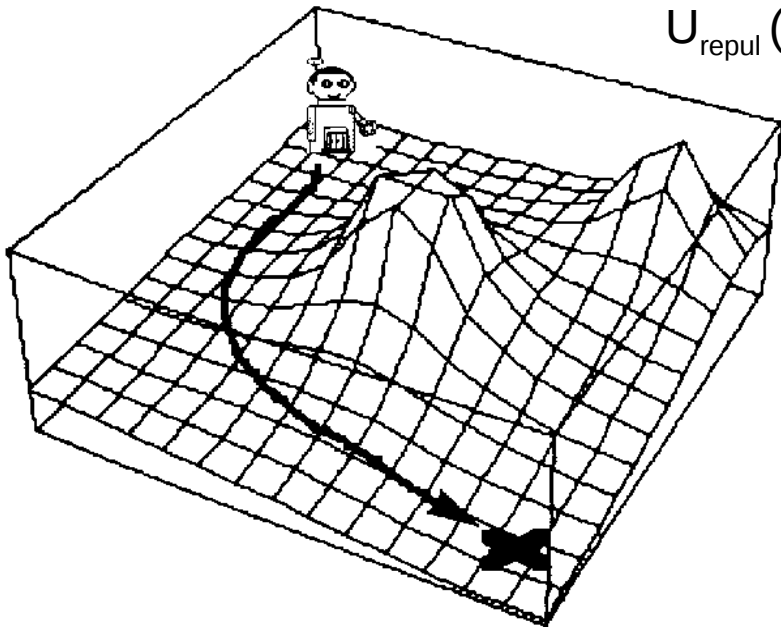
$$U_{\text{attr}}(p) = k \cdot \text{dist}(p, p_{\text{but}})^n \quad n \geq 1$$

$$U_{\text{repul}}(p) = k' \frac{1}{\text{dist}(p, p_{\text{obs}})^n} \quad \text{si } \text{dist}(p, p_{\text{obs}}) < \text{dist}_{\text{infl.}} \quad n \geq 1$$

$$= 0 \quad \text{sinon}$$

$$U(p) = U_{\text{attr}}(p) + U_{\text{repul}}(p)$$

$$\vec{F}(p) = -\vec{\nabla}U(p) \quad (\text{pour descendre le champ scalaire})$$



Éviter les minima locaux

Sans représentation de l'environnement :

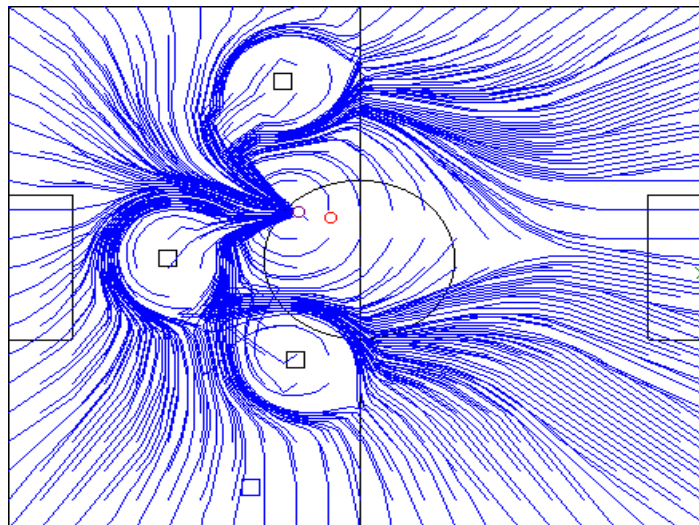
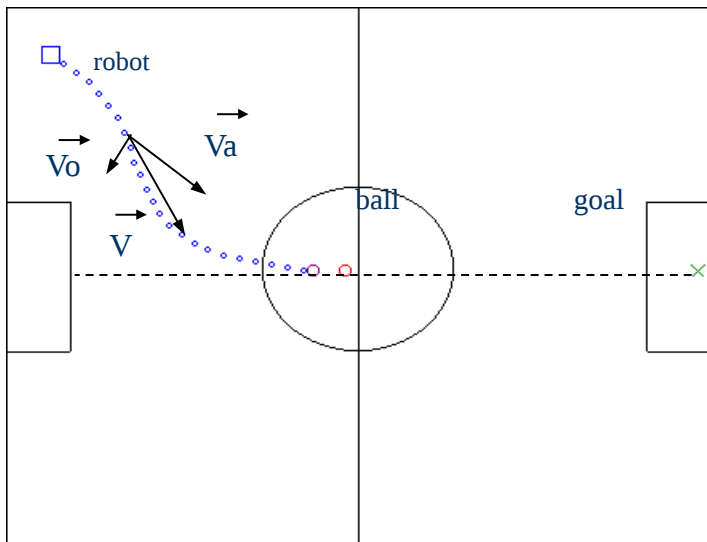
- Approche **Tabou** (interdire les dernières positions visitées)
→ nécessite un minimum de **mémoire**
- **Suivi de bord** (formes concaves) : **idem**
- Utiliser une **fonction harmonique** = pas de minimum locaux
(fonction deux fois continûment dérivable et qui satisfait l'équation de Laplace $\nabla^2 f = 0$), mais **pas de forme analytique générale**

Avec *représentation/modification* de l'environnement :

Calcul depuis le but (eg. algo de la vague,
[Baraquand Latombe 1991])

Application des champs : robots footballeurs

Besoin de rapidité, de décision/navigation en temps réel



Agent réactif à base de comportements

On suppose que le robot est muni

- d'un ensemble de **perceptions locales**
- d'un ensemble de **comportements élémentaires**

Comment **articuler** les perceptions et les comportements pour réaliser une tâche ?

Diagramme d'états fini

Arbib et al 81

C'est un quadruplet (Q, T, q_0, F)

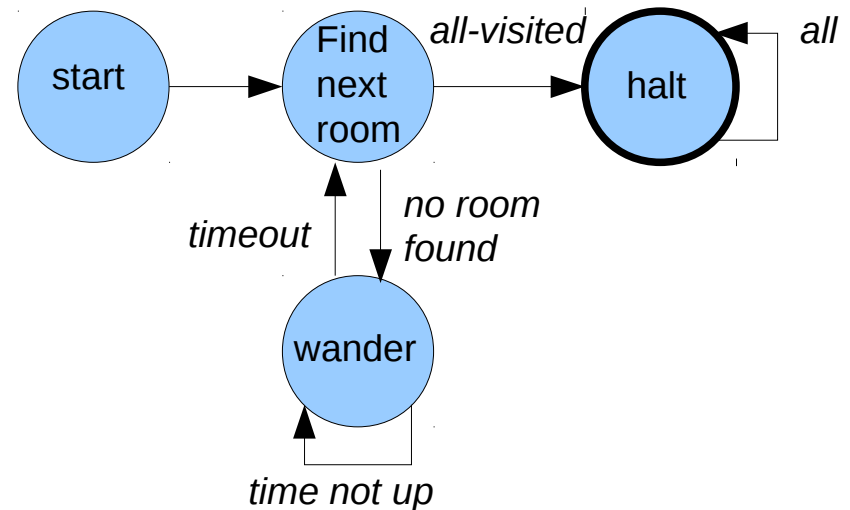
Q = ensemble des états comportements

T = fonction de transition entre états

q_0 = état initial

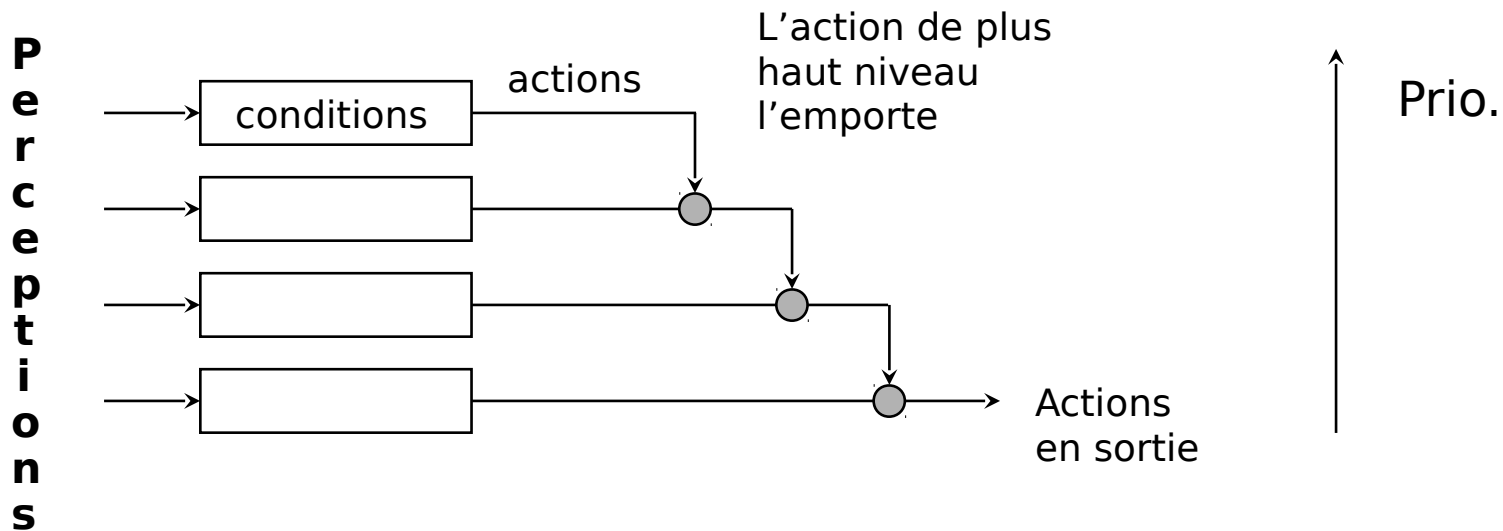
F = états finaux

Exemple :



Toujours utilisé, mais ne donne aucune aide sur comment coordonner les actions..

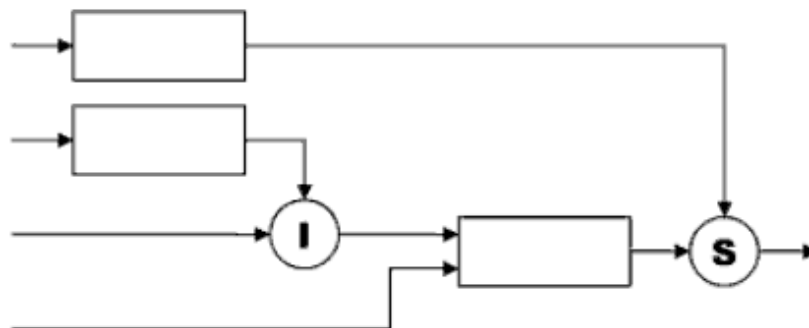
Architecture de *subsomption* [Brooks 86]



Simple mais structure rigide et non évolutive...

Subsumption : quelques extensions

- Connexion sorties vers entrées
- Nœuds inhibiteurs (en plus des supprimeurs)



Codage de la *subsomption*

On écrit des règles du type

```
si (cond 1) alors action1()  
  sinon si (cond 2) alors action2()  
    sinon si (cond 3) alors action3()  
      ...  
        sinon actionParDefaut()
```



***Subsomption* : petit exercice...**

Je suis le robot 'PacMan', je cherche à consommer au plus vite toute la nourriture, pour cela je fonce dans les couloirs du labyrinthe !

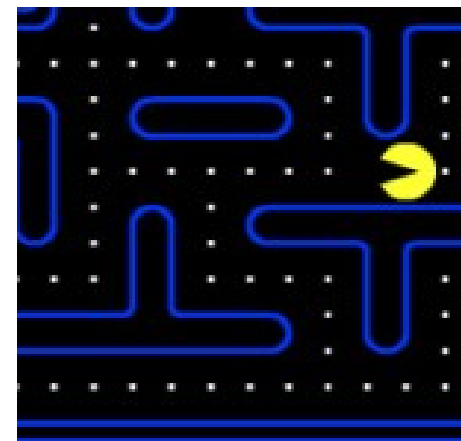
Perceptions :

- mur devant moi,
- mur à gauche,
- mur à droite,
- je ne vois rien,
- nourriture perçue,
- nourriture à côté

Actions :

- aller vers nourriture,
- tourner à droite,
- tourner à gauche,
- aller tout droit,
- manger

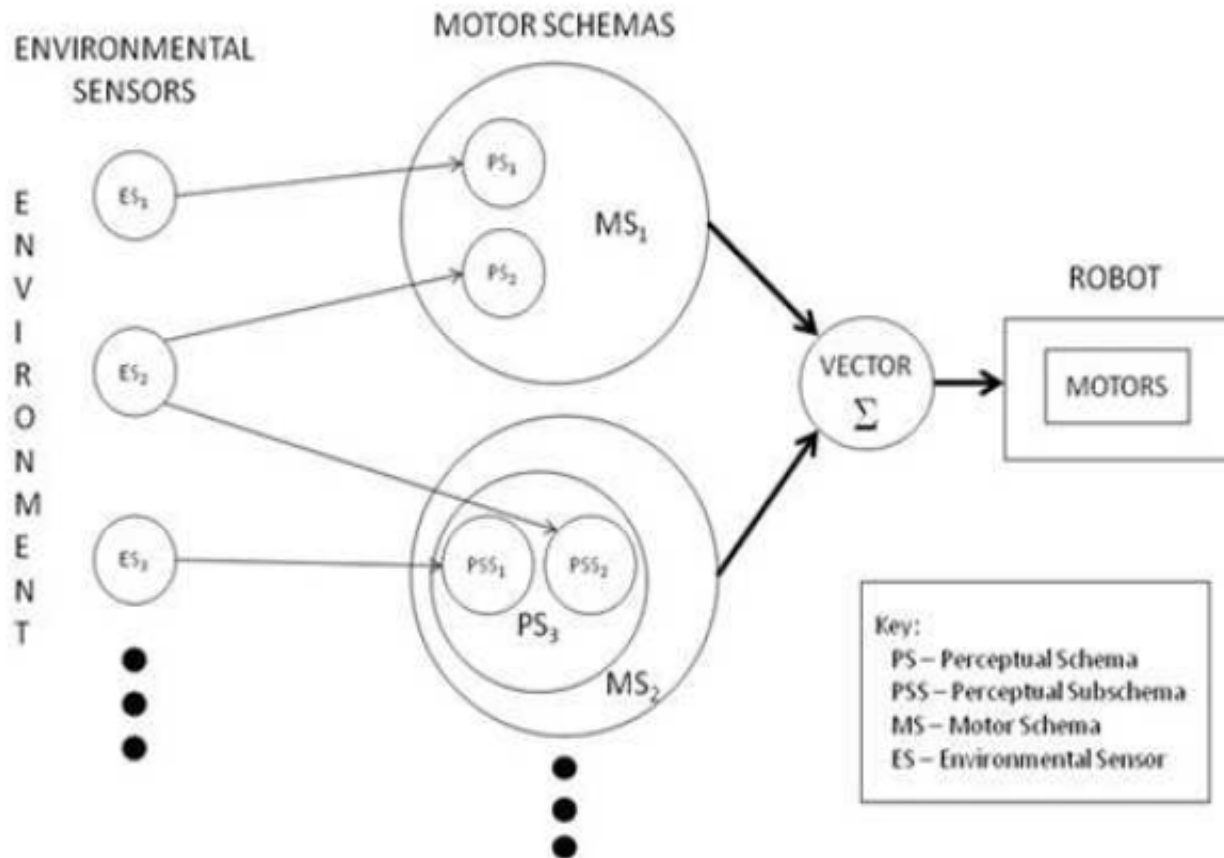
L'objectif est d'écrire une architecture de *subsomption* simple avec le minimum de niveaux..



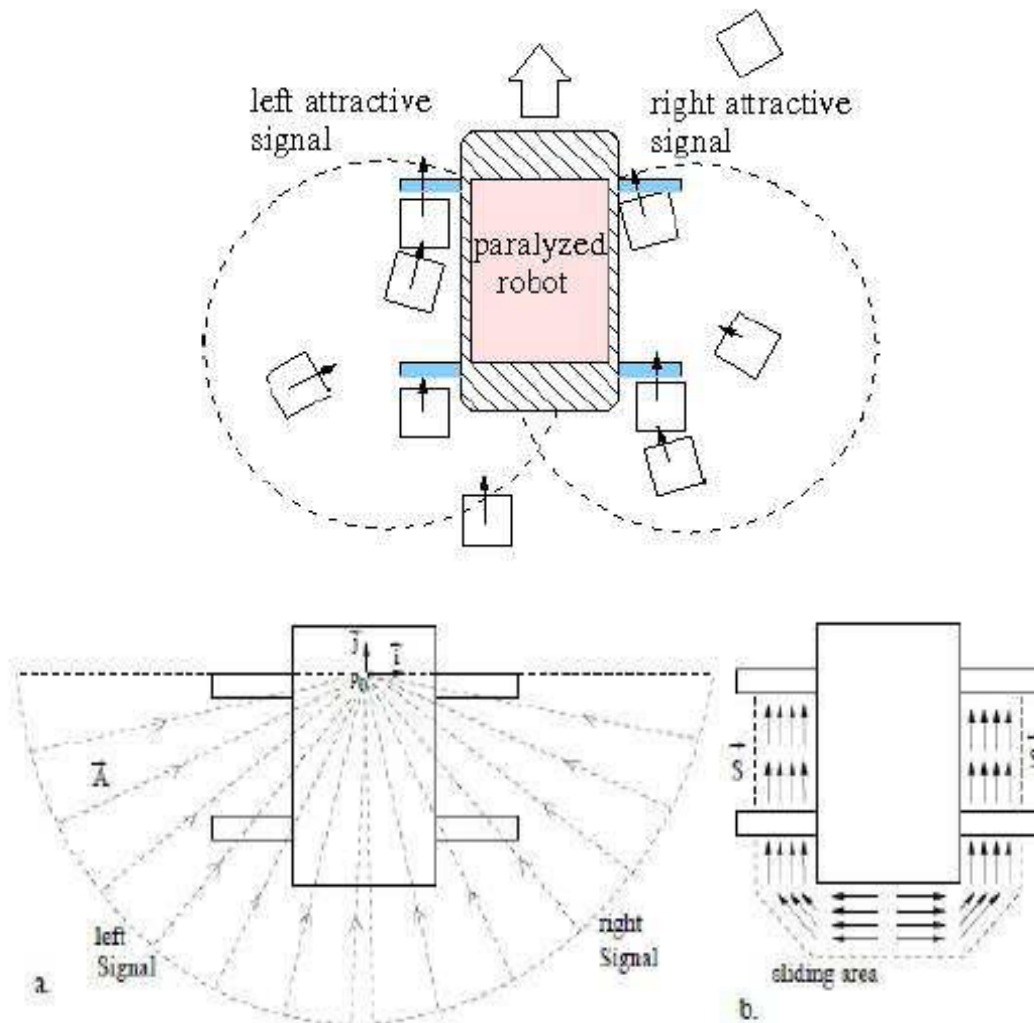
Subsomption : une solution à discuter ..



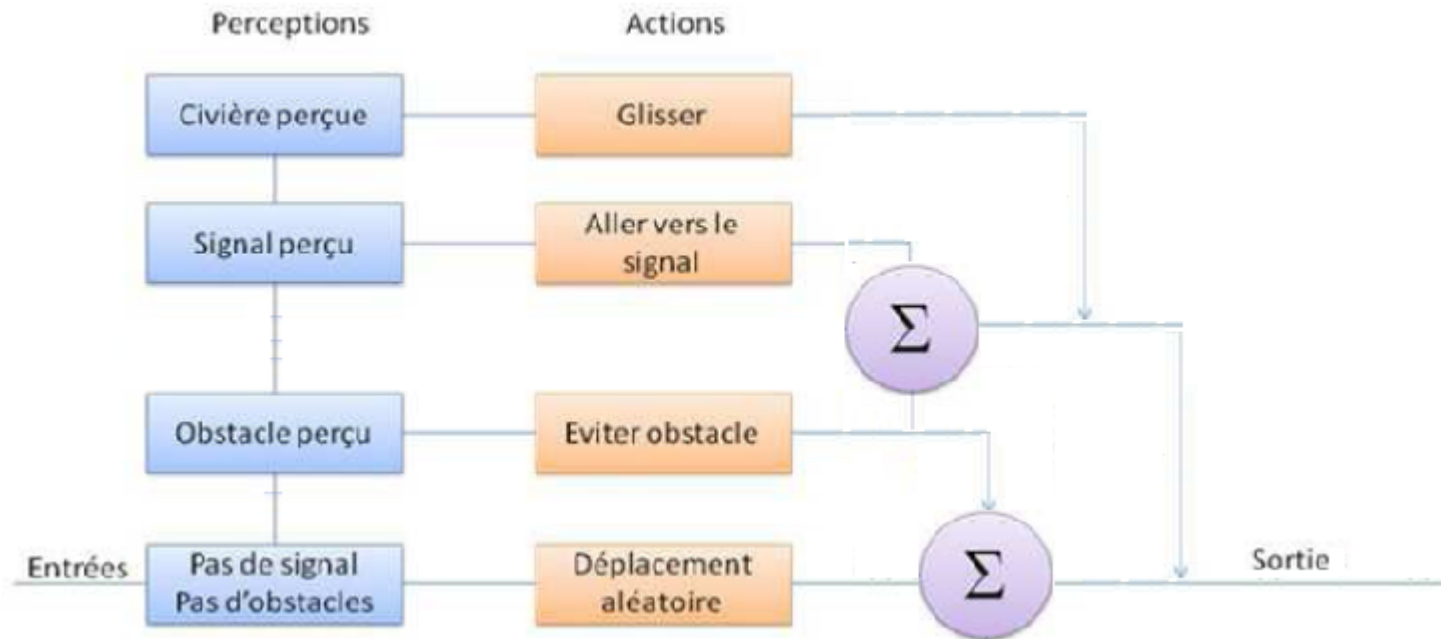
Schémas moteur [Arkin90]



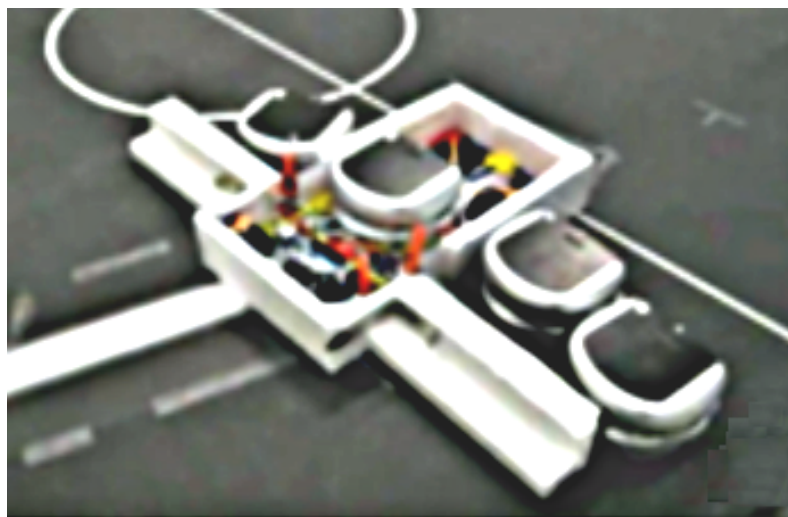
Application : “robot-pushing” (civière)



Combiner schémas moteur et *subsumption*

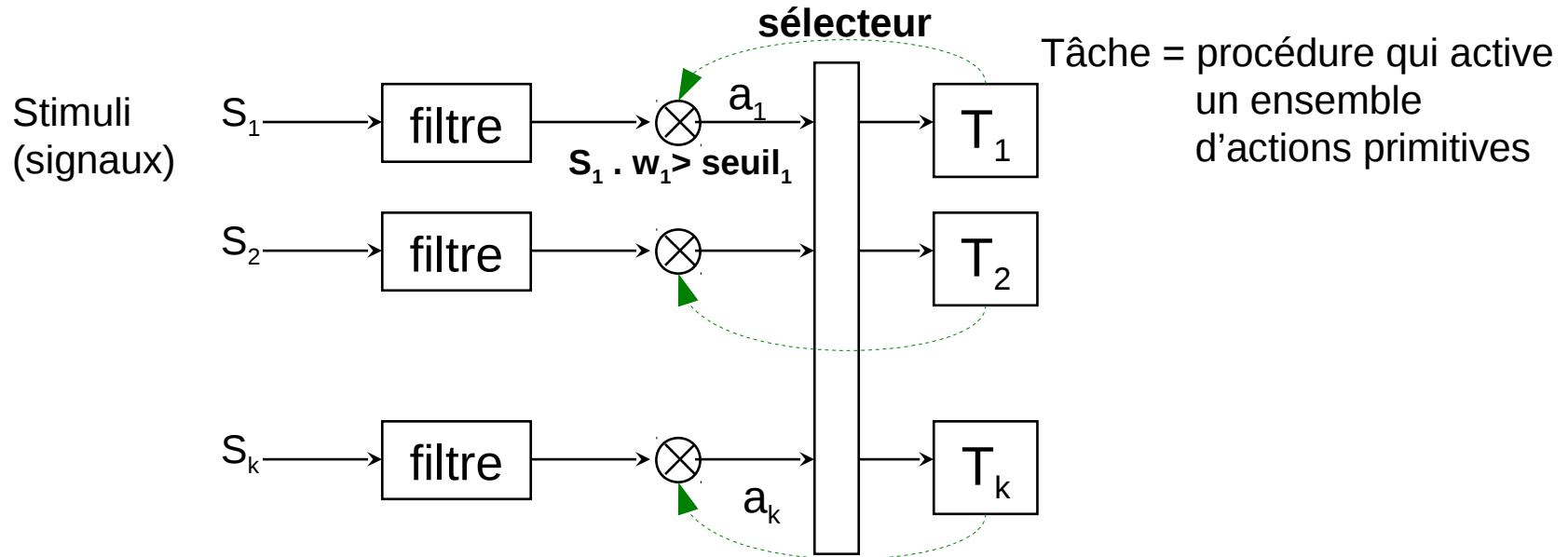


Schémas moteur + *subsumption* : résultat



Tâches en compétition [Maes 90]

Augmente le poids w_1

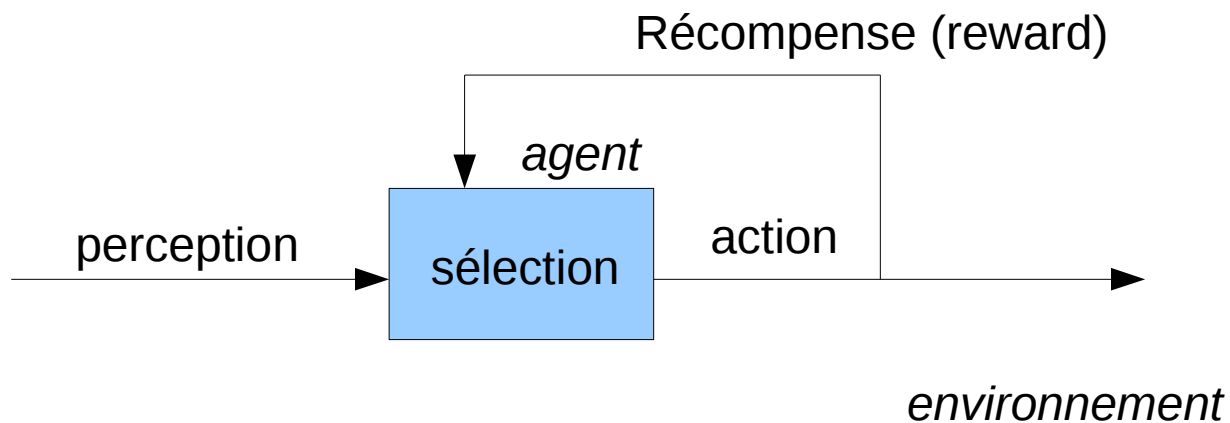


La sélection : on choisit T_i correspondant à l'activation a_i la plus forte, à chaque déclenchement d'une tâche son poids w est augmenté

-> **Spécialisation** de l'agent pour les tâches les plus déclenchées (cf. Drogoul 93)

(Modèle inspiré de la spécialisation des tâches chez les fourmis)

Apprentissage des réactions



Apprentissage par renforcement...

Plan

I. Introduction à l'intelligence en essaim

II. Automates cellulaires

III. Comportements réactifs

Braitenberg, champs de force, à base de comportements

IV. Systèmes Multi-Agent réactifs

Agent, système & simulation

V. Résolution collective de problème

- Résolution par coordination spatiale
- Résolution par marquage de l'environnement
- Un paradigme général ?

SMA = entités autonomes en interactions

Origine : connexionnisme, calcul parallèle, biologie cellulaire

- Minsky (80) : la société de l'esprit
- Varela (72) : système autopoïétique (*poièsis* = production, création)
[~ auto-organisation]

Principe de l'approche

- Modélisation au niveau de l'individu : **l'agent**
- Modélisation des **interactions** : actions des agents, communications
- Modélisation de **l'environnement**

- SMA = système dans lequel des agents opèrent collectivement et de façon décentralisée pour accomplir une tâche.

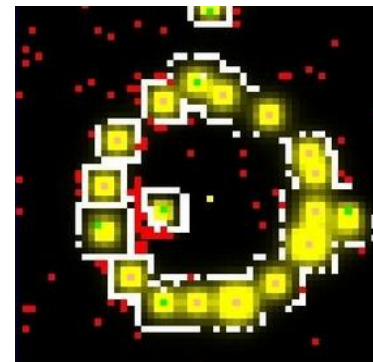
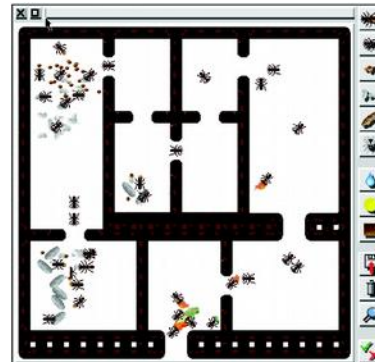
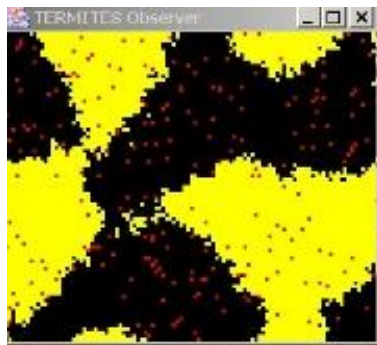
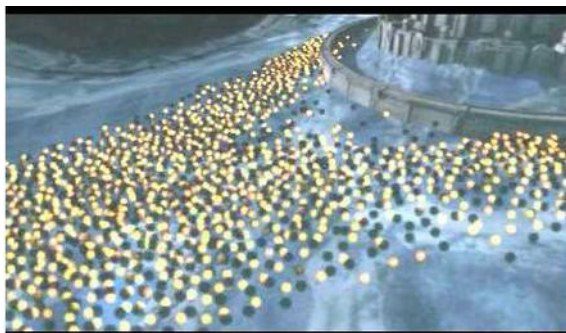
Premiers travaux : simulations

Simulation de population d'individus simples (cellules, insectes)

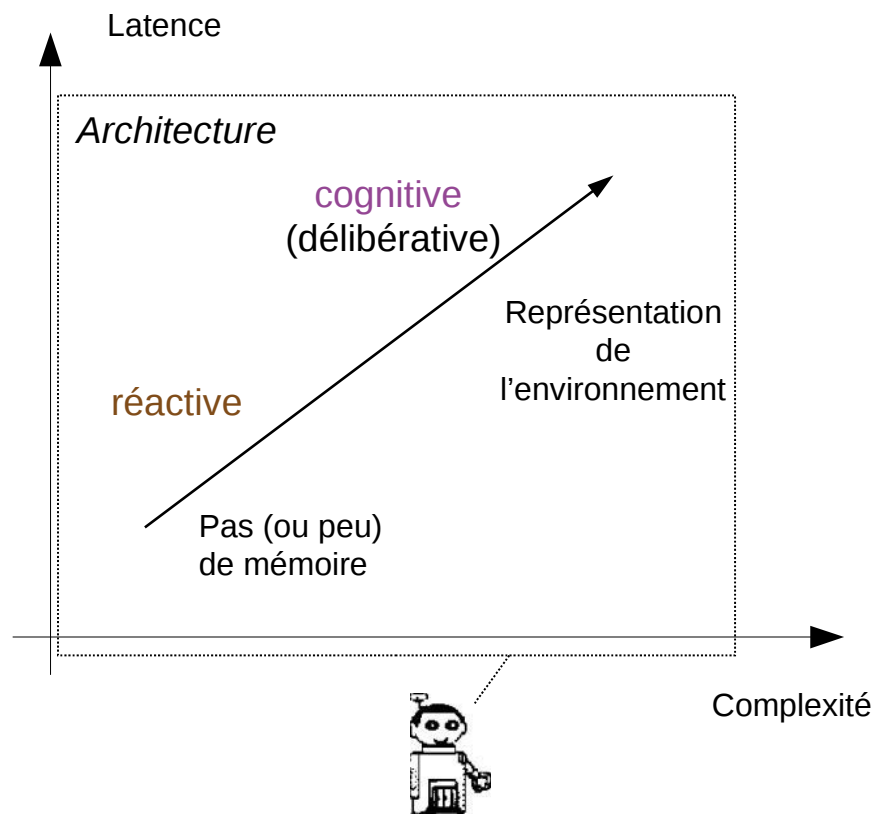
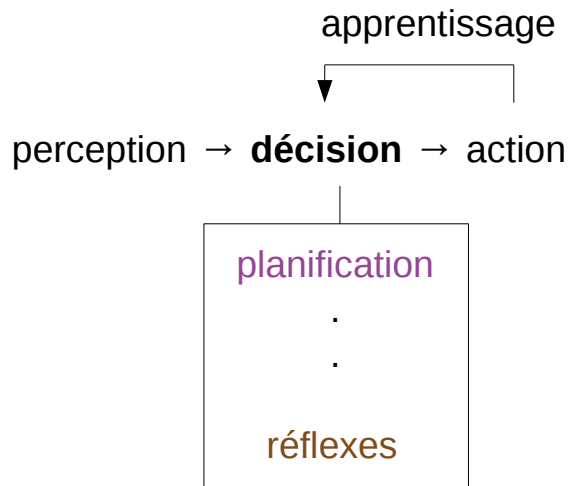
- Termites de Resnick 1994
- Fourmis (Steels, Deneubourg 1989, Drogoul Ferber 1992)
- Émergence multi-niveau (Beurier 2002)

Des outils de simulation multi-agent

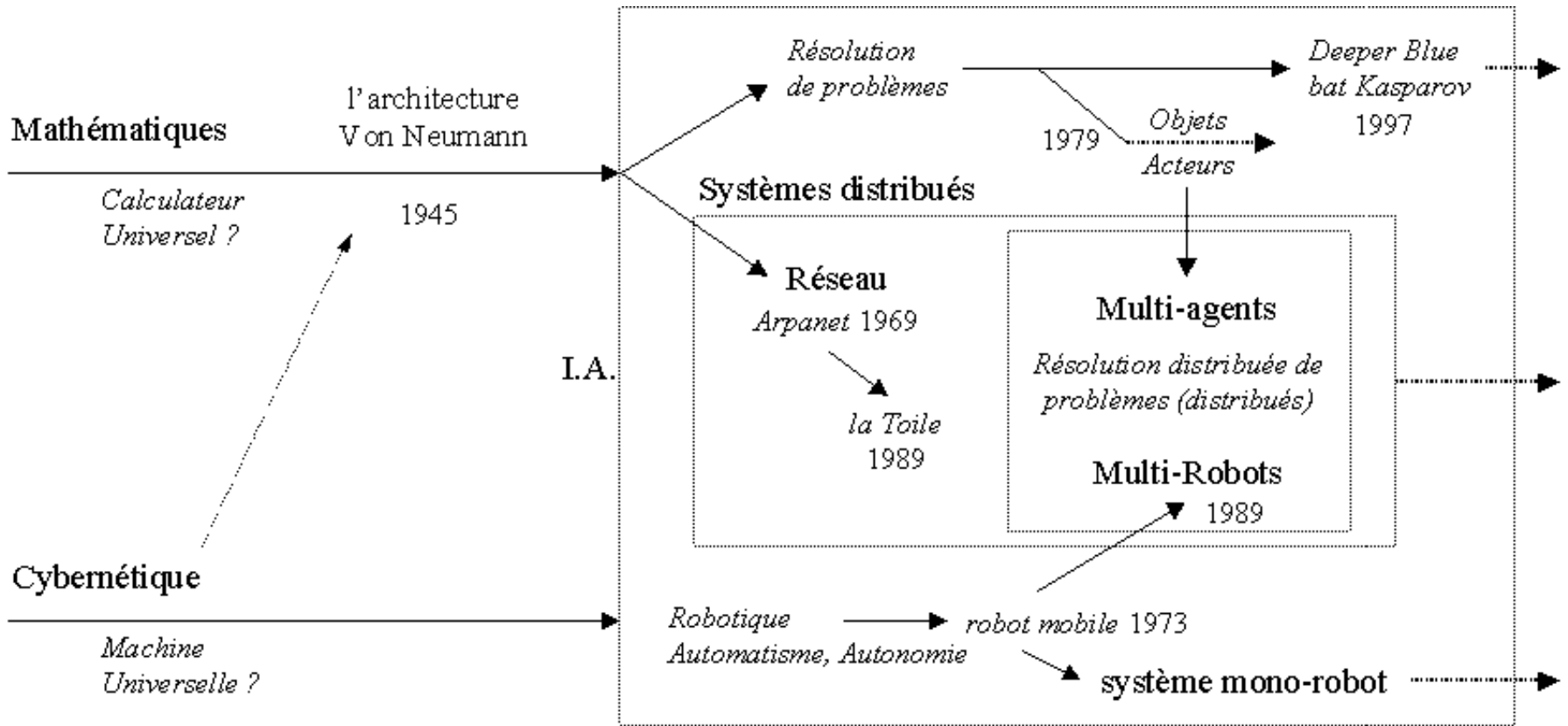
- Netlogo, MadKit (TurtleKit), Swarm, etc



Agent cognitif / réactif



SMA et IA : un peu d'histoire..



SMA réactif : définition (& formalisme)

Agent réactif

- des perceptions uniquement **locales**
- un ensemble **d'actions** possibles
- des comportements **réflexes** : perceptions → actions

- pas ou peu de mémoire
- pas de communications directes

Système multi-agent réactif

- n agents réactifs : a_1, a_2, \dots, a_n
- un **environnement** qui peut être passif ou actif (calcul)

- pas de chef d'orchestre
- environnement non connu des agents

SMA réactif : simulation du vivant

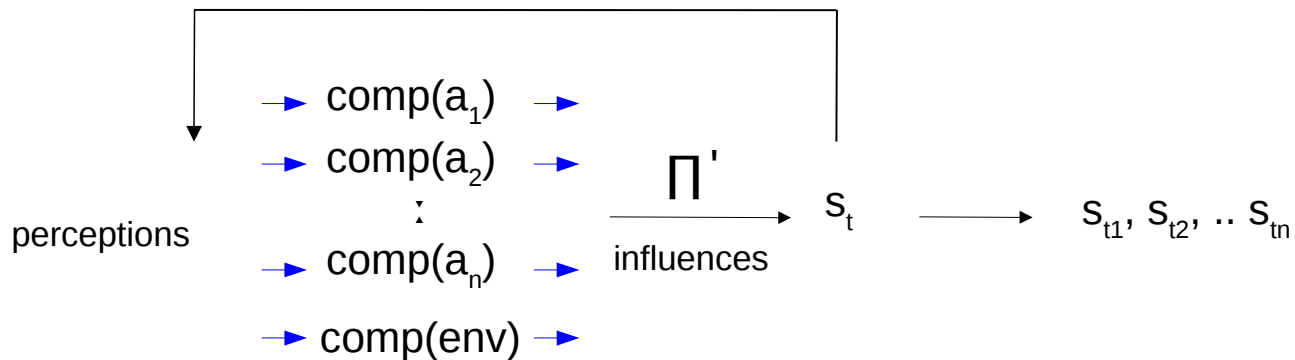
Objectifs

- Étude des comportements **microscopiques**
- Étude de **l'émergence** : relation micro-macro
- Développement de simulateurs : Netlogo, MadKit, Jade, etc.

Des problématiques

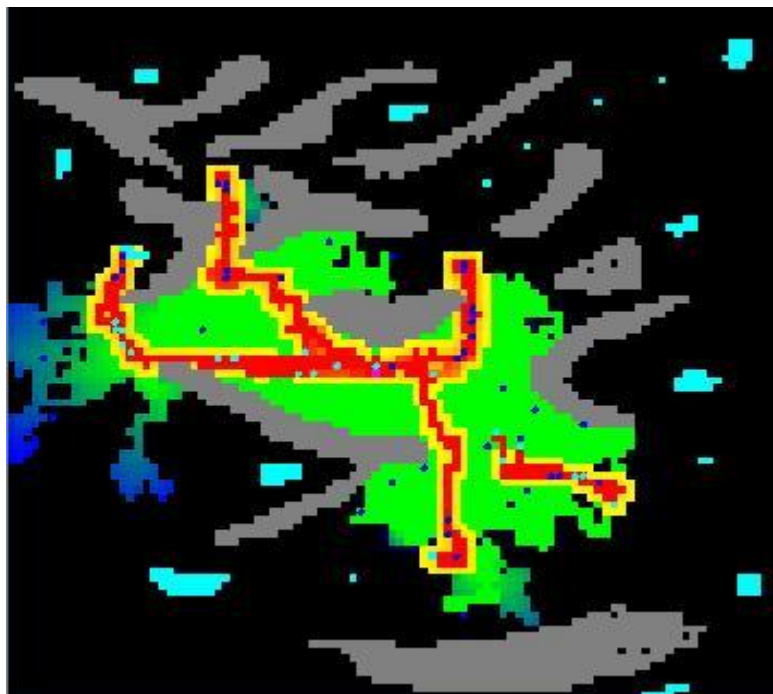
- Simultanéité des actions de N agents → biais de programmation ?
Modèle **Influence-Réaction** [Ferber Muller 96]
- Gestion de l'indéterminisme → biais de programmation ?
- Reproductibilité du vivant → plausibilité biologique ?
- Simulation réaliste pour des systèmes robotique ?

SMA réactifs : simulation



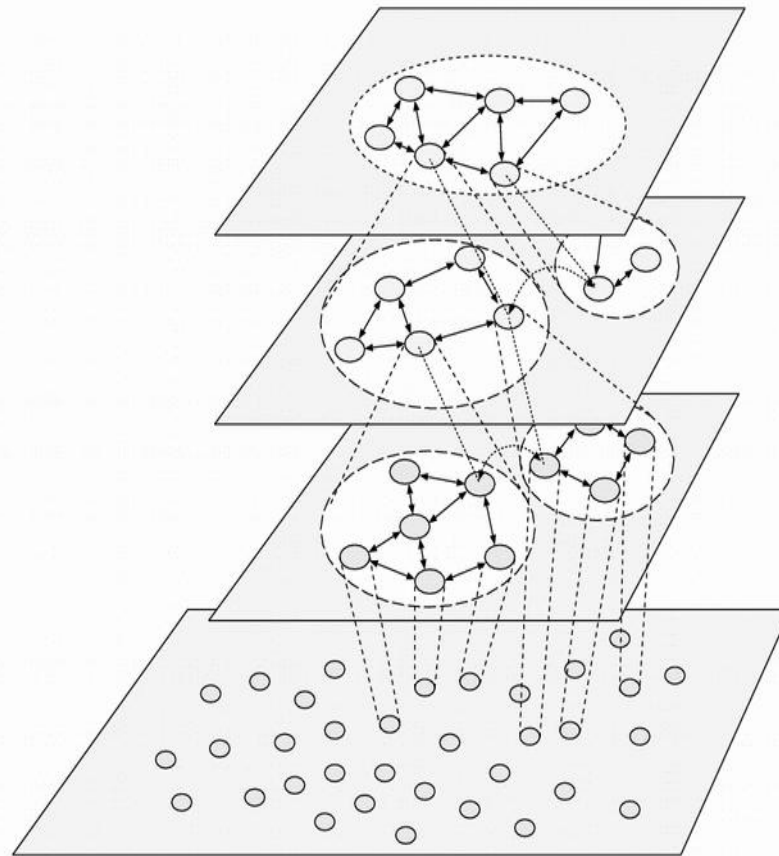
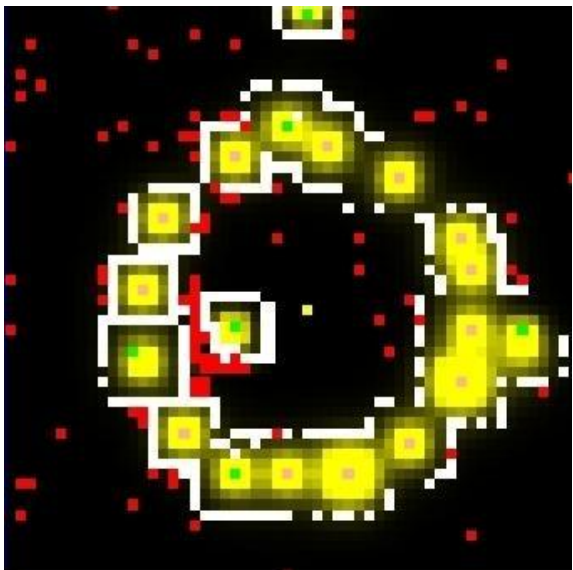
Modèle Influence-Réaction [Ferber, Muller 95], [Michel 07]

Illustration : étude du foraging



Simu. modèle [Panait & Luke 02]

Illustration : multi-émergence



[Beurier, Ferber, Simonin 2002]

Années 90 : vers la résolution de problème

Travaux clés

- Navigation en essaim (**Flocking**) Reynolds (86)
- Algorithmes **fourmis** pour le TSP (Deneubourg et al. 90, Dorigo et al. 91)
- J. Ferber (1995) Les SMA : vers la résolution collective de problème
 - Programmation **orientée agent**
 - **Eco-résolution**, Drogoul, Jacopin, Ferber 1993
- **Pheromones digitales**, Parunak 1997

Plan

I. Introduction à l'intelligence en essaim

II. Automates cellulaires

III. Comportements réactifs

Braitenberg, champs de force, à base de comportements

IV. Systèmes Multi-Agent réactifs

Agent, système & simulation

V. Résolution collective de problème

- Résolution par coordination spatiale
- Résolution par marquage de l'environnement
- Un paradigme général ?

Flocking et approche vectorielle

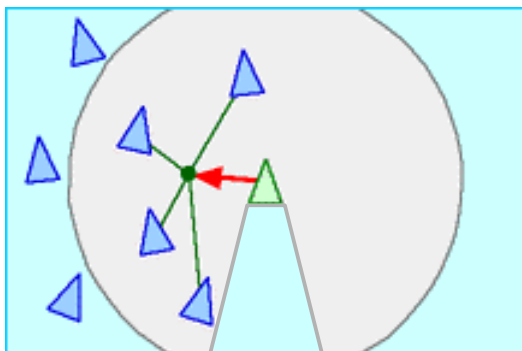
Hypothèses

- Les agents évoluent comme des **particules** soumises à des champs
Rayon de perception très limité
- Modèle **vectériel** (**Flocking** de Reynolds 87) (Zeghal 93)
- Espace **continu**

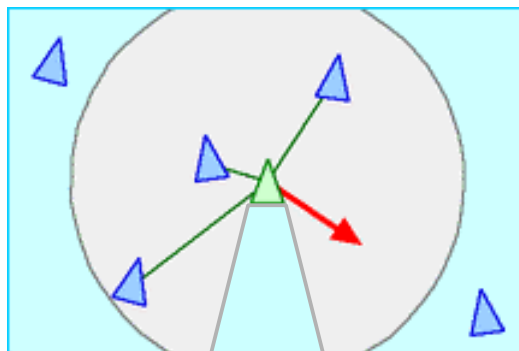
Navigation réactive :
$$\vec{V} = \vec{A}_{att} + \sum_i g_i \cdot \vec{R}_{ep}_i$$

Flocking

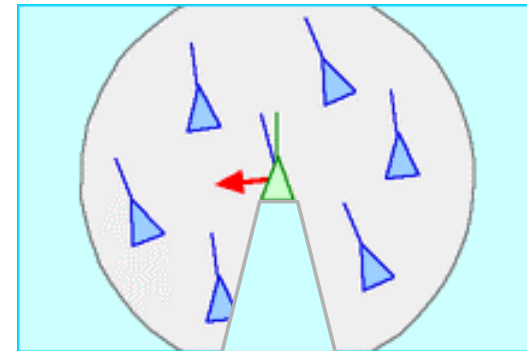
- Les boïds de Reynolds
→ reproduire les nuées d'oiseaux (1987)
- Combinaison de trois forces / perceptions locales



cohésion



séparation



alignement

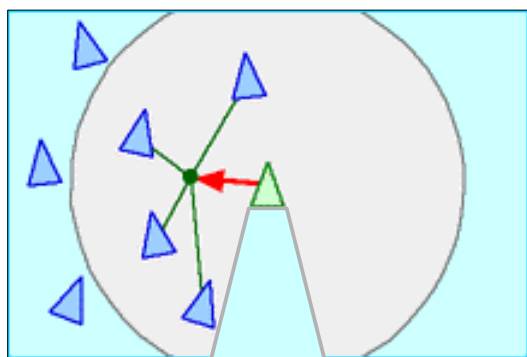
Flocking

- Problème : naviguer en essaim

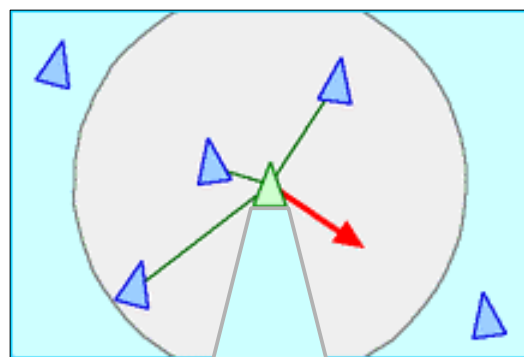
Navigation réactive : $\vec{V} = \vec{Att} + \sum_i g_i \cdot \vec{Rep}_i$

Flocking : $\vec{V} = g_1 \cdot \vec{C} + g_2 \cdot \vec{A} + g_3 \cdot \vec{S}$

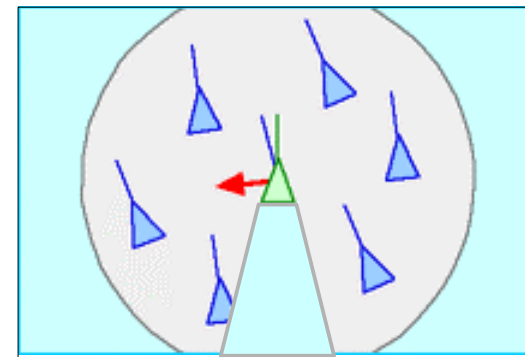
- Second TP ...



cohésion : \vec{C}



séparation : \vec{S}



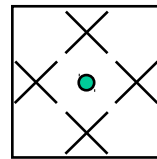
alignement : \vec{A}

Application au problème proie(s) - prédateurs

4 prédateurs :

- ils doivent encercler une proie pour la consommer,

gagné

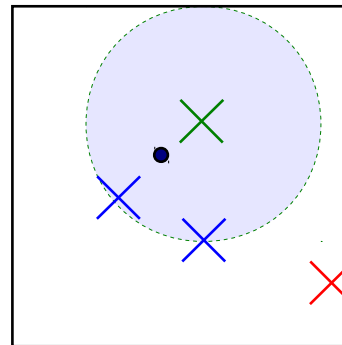


perdu

1 Proie :

- elle doit essayer de leur échapper

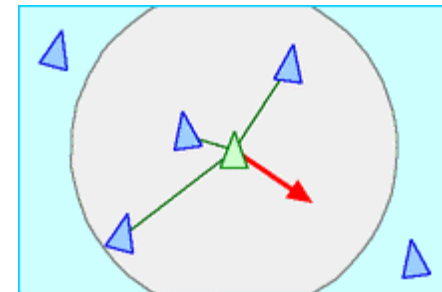
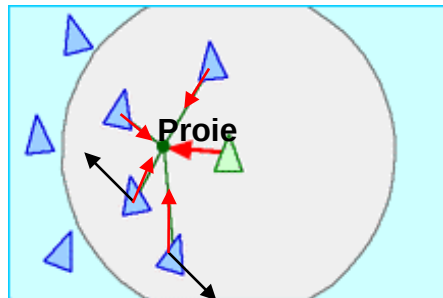
- ils n'ont qu'une vision locale de l'environnement



- elle n'a qu'une vision locale

$$\vec{F}^a + \sum_{1 \leq i \leq 4} \vec{F}_i^r$$

$$\sum_{1 \leq i \leq 4} \vec{F}_i^e$$

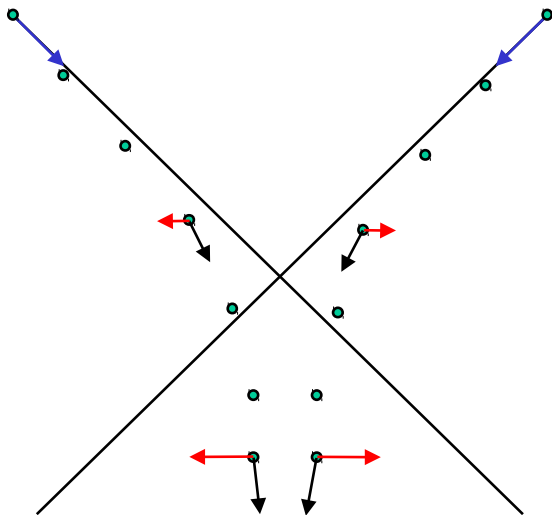


Variante plus complexe : et s'il y a plusieurs proies ?

Défaut de l'approche "vectorielle"

Effet de symétrie

exemple : 2 agents qui suivent des directions perpendiculaires se croisant tout en appliquant une force répulsive d'évitement



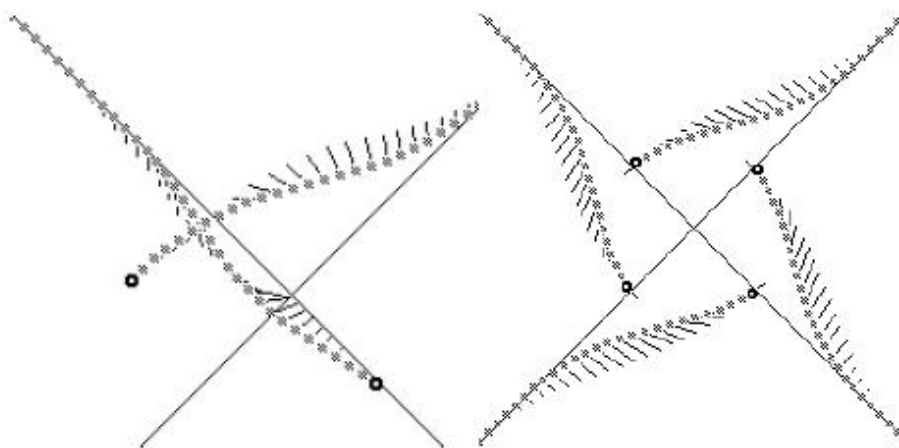
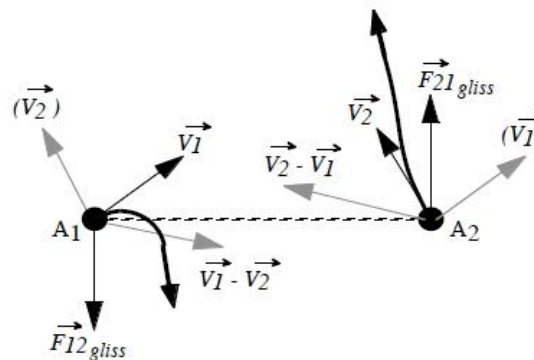
Il existe des solutions, par exemple
les forces de glissement
(Thèse de [K. Zeghal 94])

Forces de glissement

Thèse de [K. Zeghal 94]

$$\vec{F}_{\text{gliss}} = \text{proj}_{\perp}(\vec{F}_{\text{rep}})$$

$$\text{Dépl.} = \vec{V}_{\text{att}} + \vec{F}_{\text{gliss}}$$



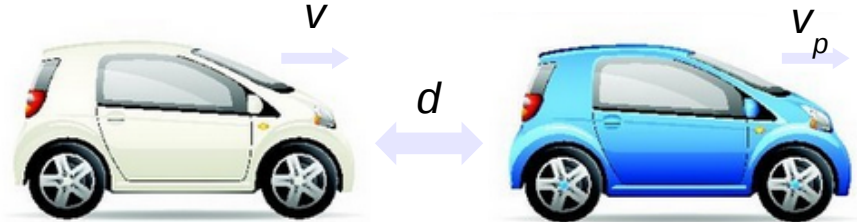
(a)

(b)

Distance minimale sans collision

- Évitement possible :

$$\delta d \geq 0, \delta d = d - d_{\min} + \min\left(0, \frac{v^2 - v_p^2}{2a_{\min}}\right)$$



- Évitement réalisé : $\delta d(t) \geq 0, \forall t$ (récurrence)

– Estimations (pire cas) : $d < \tilde{d}, v < \tilde{v}, v_p < \tilde{v}_p, \delta d < \tilde{\delta d}, \tilde{\delta d} < \tilde{D}$

– Résolution : $a_{\lim} \text{ ? } / (\delta d(t) \geq 0) \wedge (a(t) \leq a_{\lim}) \Rightarrow (\delta d(t+1) \geq 0)$

– Simplifications :

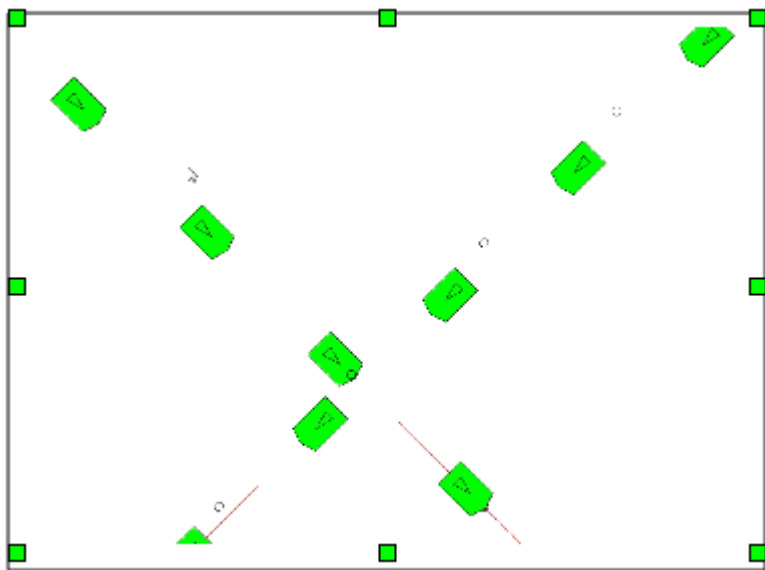
$$a_{\lim} \text{ ? } / (\tilde{\delta d}(t) \geq 0) \wedge (a(t) \leq a_{\lim}) \Rightarrow (\tilde{\delta d}(t+1) \geq 0) \wedge (\delta d(t+2) \geq 0)$$

$$a_{\lim}(d, v, v_p) = \min\left(a_{\min} + \frac{2 \dots}{3 \delta t^2}, \frac{\sqrt{\dots}}{\delta t}, \frac{\sqrt{\dots} - \dots}{\delta t}\right)$$

[Scheuer & al 2009]

Croisement de 2 convois (comp^t décentralisé local)

Problème : maintenir une direction rectiligne, pas d'évitement



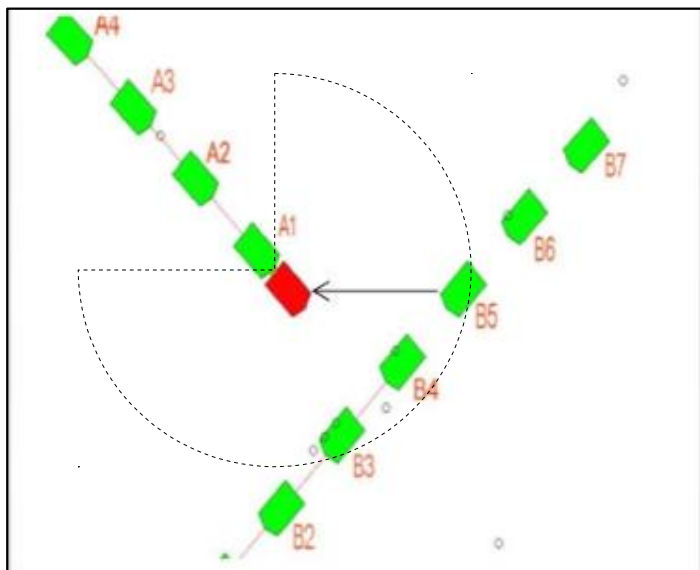
Peut-on réaliser une telle coordination avec des règles locales ?



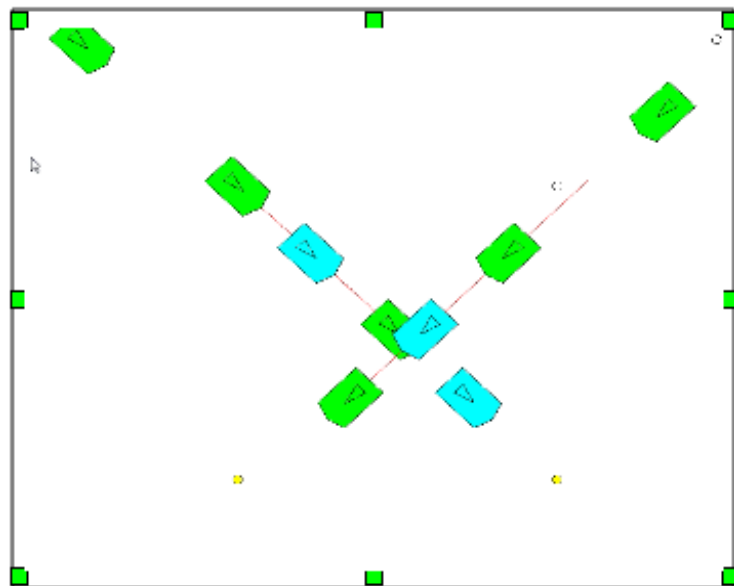
Ballet des motards de la police italienne (années '50)

Croisement de 2 convois (comp^t décentralisé local)

Problème : maintenir une direction rectiligne, pas d'évitement



Régulation avec des agents virtuels (fantômes)

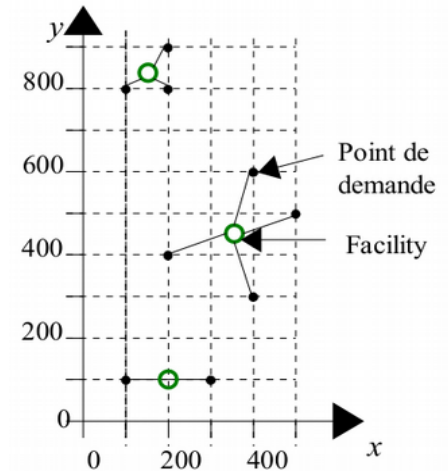


[Albouze, Simonin 2010]

Problèmes d'optimisation spatiale

Facility Location Problem (p-median continu) NP-difficile

- Positionner k ressources $P = \{p_1, \dots, p_k\}$ (facilities) pour servir n demandes $\{a_1, \dots, a_n\}$ pondérées (fixes)
- Cherche $\min_P F(P) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \min_{p_j \in P} d(p_j, a_i)$



Approche par auto-organisation (thèse de S. Moujahed, 2004-07)

- Une ressource = un agent réactif
- Les agents évoluent sous l'influence d'attracteurs et de répulseurs.

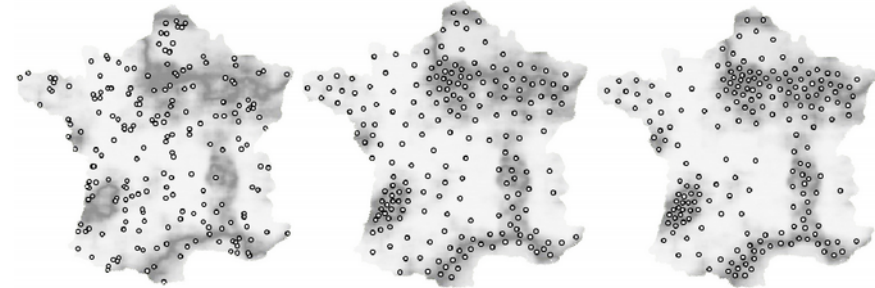
Déplacement de l'agent :

$$p_j = p_j + \alpha \sum_i \vec{F}_{a_i} + (1 - \alpha) \sum_j \vec{R}_{p_j}$$

Une approche générique

Convergence vers un état stable

convergence locale et globale



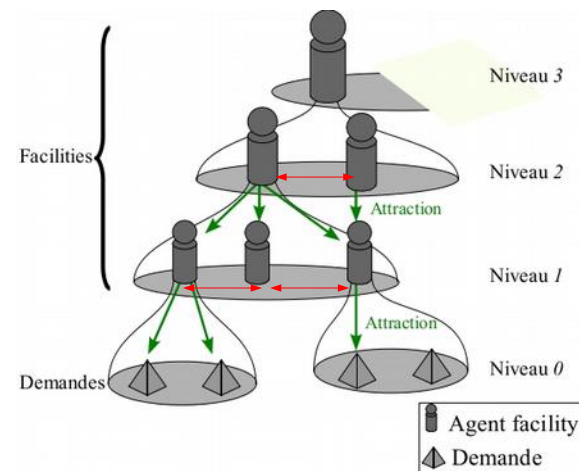
demandes = niveau de gris

Performances

- comparables ou meilleures que les heuristiques connues (*benchmarks*)
- faible coût calculatoire (pas d'éval. fn. globale) + distribution

Adaptation à des variantes

- *environnement contraint*
- *positionnement dynamique*
- *positionnement multi-niveaux*



[Moujahed, Simonin, Koukam 08]



À suivre ...