



Explorer les systèmes spatiaux complexes

Arnaud BANOS



1





Photo: A. Banos



Photo: P. Mudu



Photo: P. Mudu



Photo: P. Mudu



Photo: P. Mudu



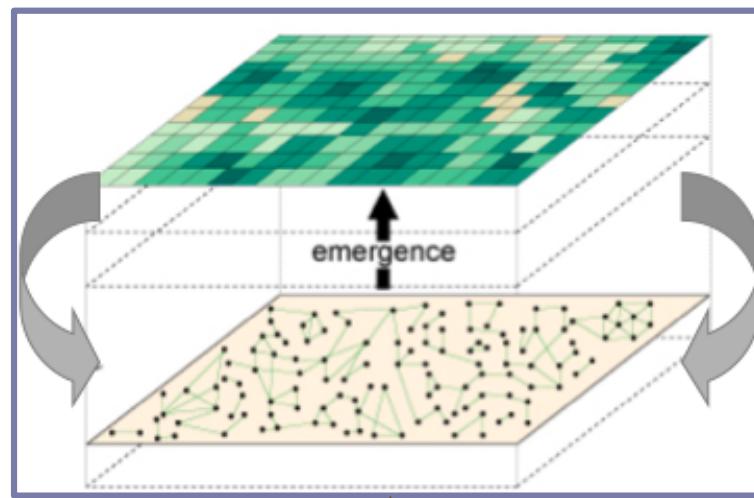
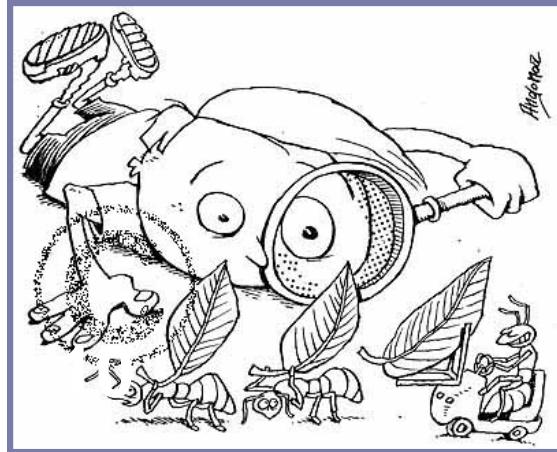
Photo: P. Mudu



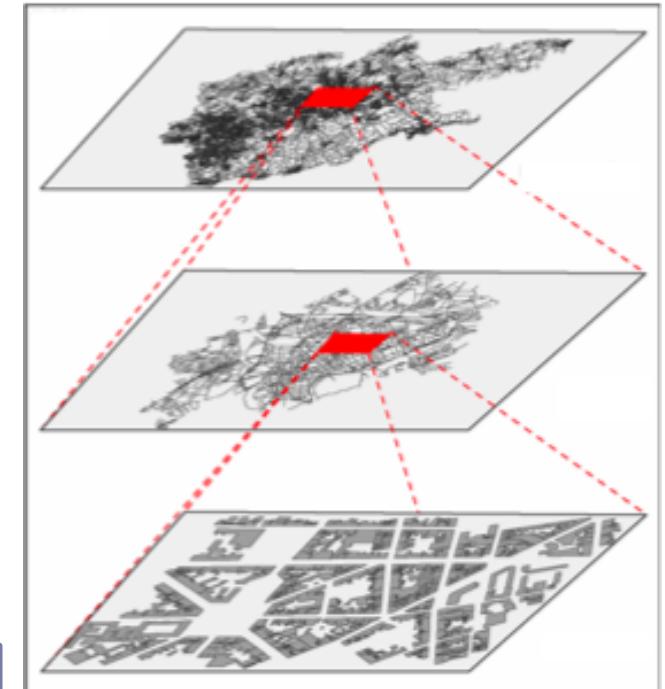
Photo: P. Mudu



Photo: P. Mudu



(E. Daudé)



Lequel est complexe ???



Et si on prenait un verre ?



Stratégie 1



B



A



Et si on prenait un verre ?



Stratégie 1



B



A



Stratégie 2



A



B



Conclusions

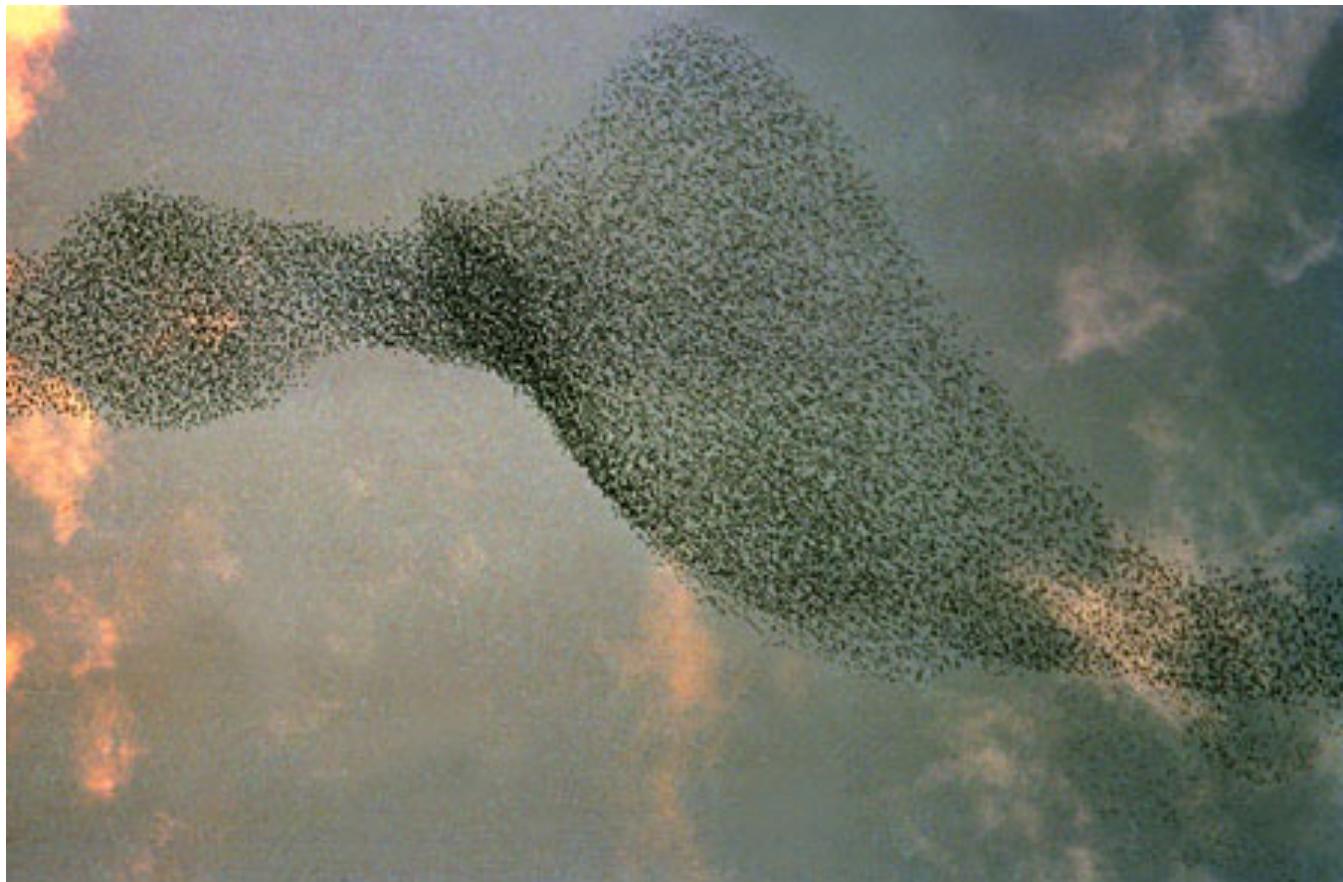
- Difficile de deviner le comportement global (macro) même en connaissant précisément les règles locales → SIMULATION
- Difficile de deviner les règles locales (micro) à partir du comportement global (macro) → RECONSTRUCTION, PROBLEME INVERSE

Introduction aux systèmes (spatiaux) complexes adaptatifs

Lectures

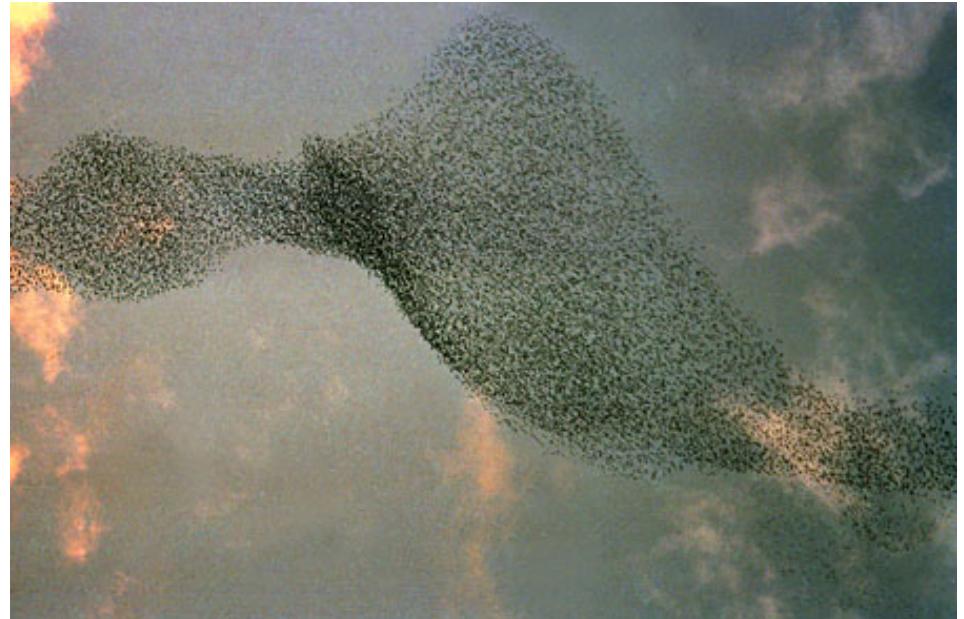
- Benkirane, 2002 : La complexité, vertiges et promesses, Le Pommier, Paris
- Johnson, S. (2001) Emergence: The Connected Lives of Ants, Brains, Cities, and Software, Scribner, New York
- Waldrop M., 1992 : Complexity : the emerging science at the edge of chaos, Simon and Schuster, New-York
- Pour la Science, N° Spécial « La complexité : la science du XXI^{ème} siècle », décembre 2003
- Epstein et Axtell, 1996 : Growing artificial societies : social science from the bottom up, Brookings Institution Press, MIT Press, Washington DC
- Krugman, 1996 : The self organizing economy, Oxford, Blackwell Publishers
- Schelling, 1978: Micromotives and Macrobbehavior, W.W. Norton & Company
- Journal of Artificial Societies and Social Simulations :
<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS.html>
- SANTA FE Institute : <http://www.santafe.edu/>
- <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

Le vol collectif des oiseaux



Le vol collectif des oiseaux

- Déjà observé ça ?
 - Y a t'il un oiseau leader ?
 - Qui coordonne le vol ?
 - Que se passerait-il s'il n'y avait pas de leader ?



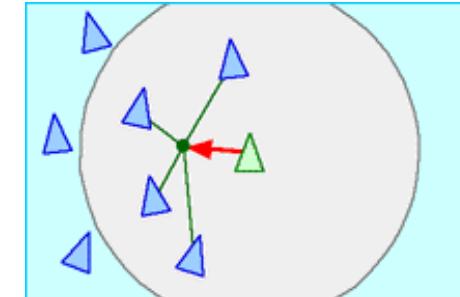
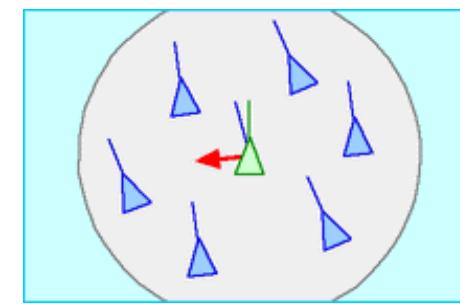
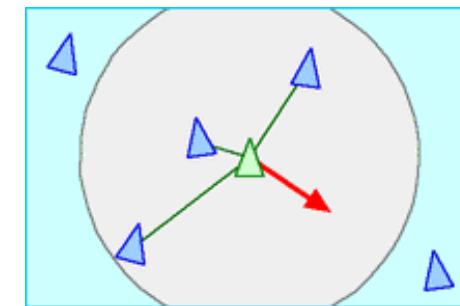
Il n'y a pas de leader !

- Chaque piaf suit des règles de comportement ultra simples
- Ce sont les interactions locales entre les piafs qui créent cet objet complexe qu'est le vol d'un banc d'oiseaux



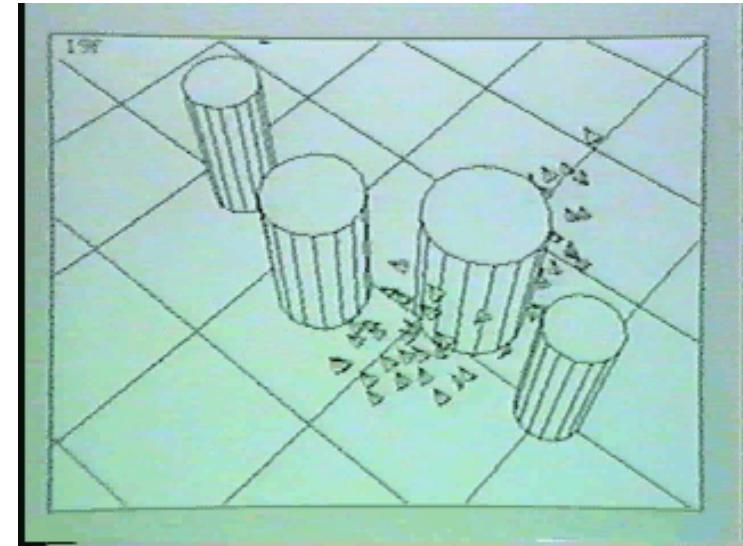
Trois règles simples

- Séparation
- Alignement
- Cohésion



Simulons ces règles et voyons les conséquences de leurs interactions

- Craig Reynolds's classic "Boids"



NetLogo : Flocking



Morale de l'histoire

- Des comportement individuels simples peuvent conduire à un comportement collectif complexe
- Système complexe adaptatif :
 - Un système sans contrôle centralisé mais qui “s’auto-organise”
 - Un système qui peut s’adapter de lui même à des changements inattendus de son environnement (obstacles)

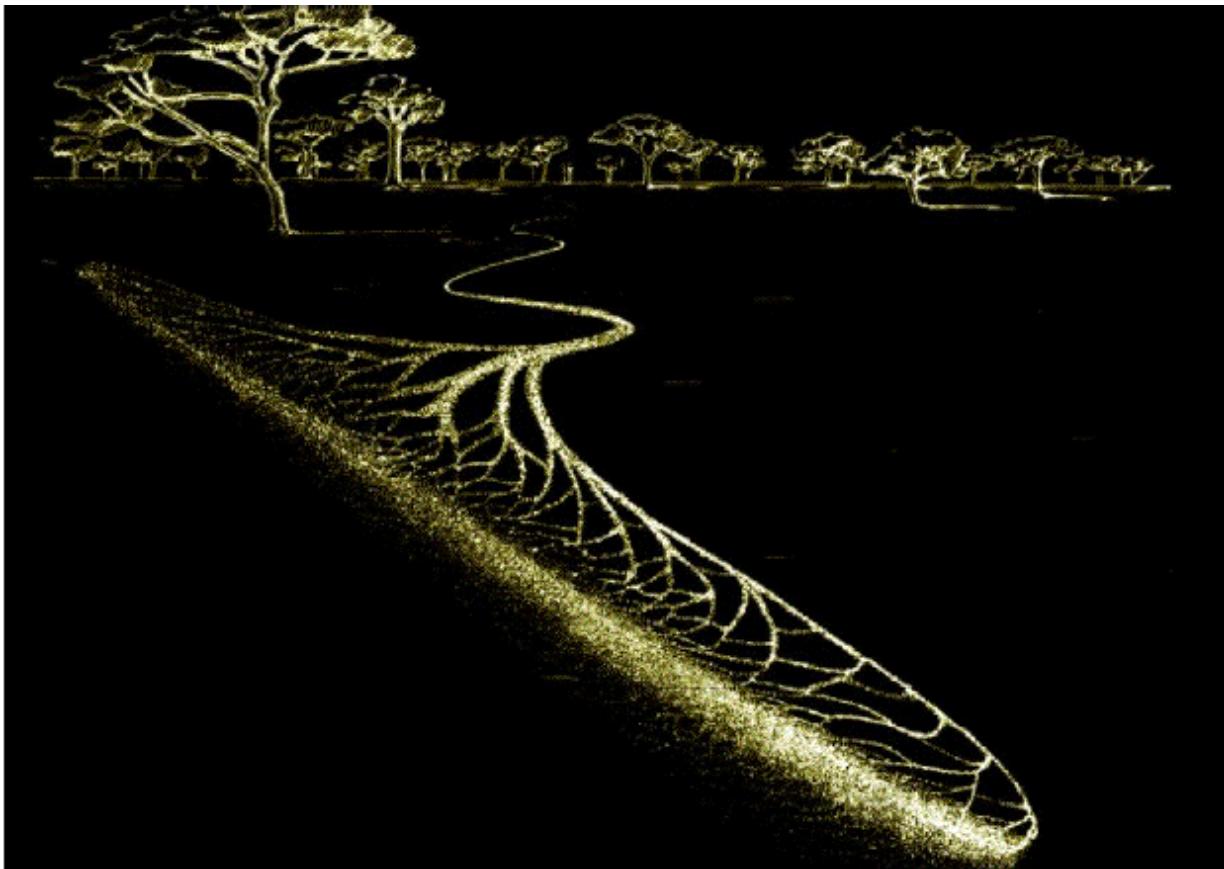
Les insectes



Intelligence collective

- Certains insectes dits sociaux (fourmis, termites, abeilles) ont des comportements collectifs très sophistiqués...
- ...alors même que chaque membre de la communauté possède des capacités individuelles très limitées

Les légions de fourmis

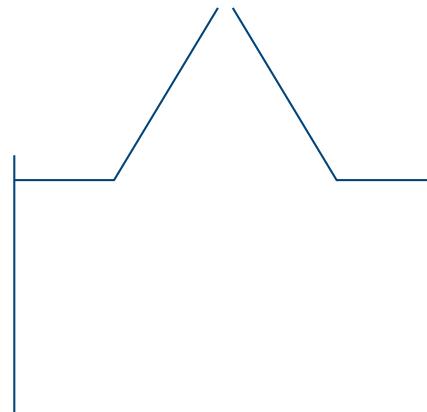
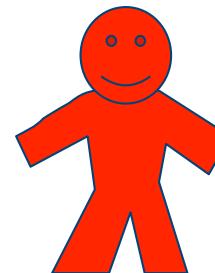


NetLogo : Ants + Termites



5-6

« Agents »



Structure Interne

- Degrés de Liberté
- Autonomie

Capacité d'action

- Mobilité Spatiale
- Réactivité (Capteurs)
- Pro-activité
- Localisées

Propriétés des Systèmes Complexes

- non prédictibles
- en partie irréductibles
- auto-organisation et émergence
- non linéaires

Non prédictibilité

- Le comportement global d'un système complexe est impossible à prévoir, même si le comportement de chacune des entités qui le constitue est prévisible
- Deux manières de déterminer l'évolution d'un système complexe :
 - l'observer
 - le simuler

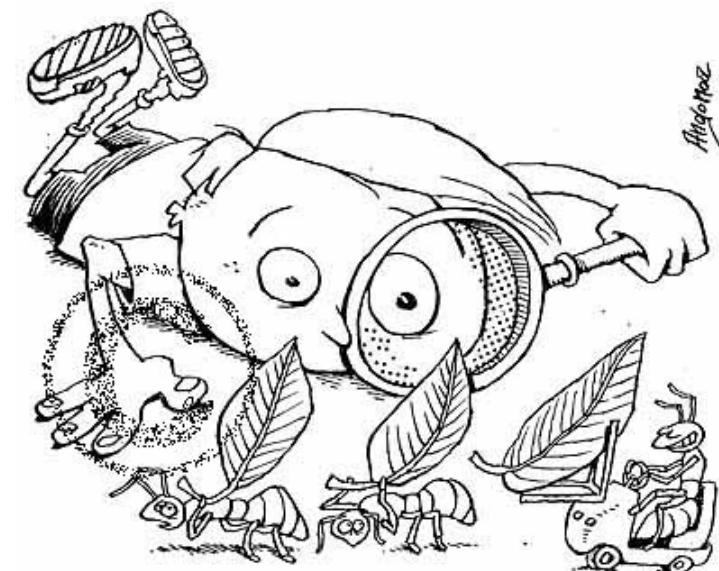
Irréductibilité

- Impossibilité de construire un modèle (i.e. une représentation plus simple que la réalité) du système sans perdre ce qui en fait l'essence même, c'est à dire ses propriétés fondamentales
- Impossibilité d'obtenir une expression synthétique (par exemple fonctionnelle) d'un tel système ➔ Modèles informatiques + Simulation

Laboratoires virtuels

- Définir un environnement → processus propres
- Le peupler avec des agents
- Définir des scenarios
- Simuler
- Valider

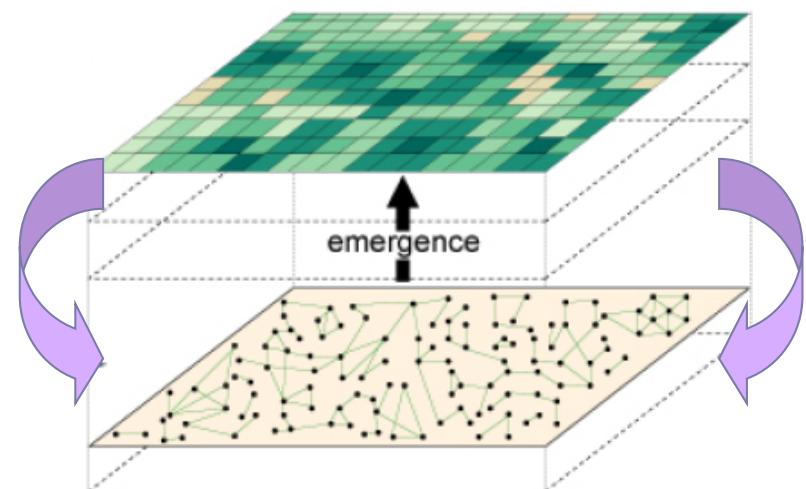
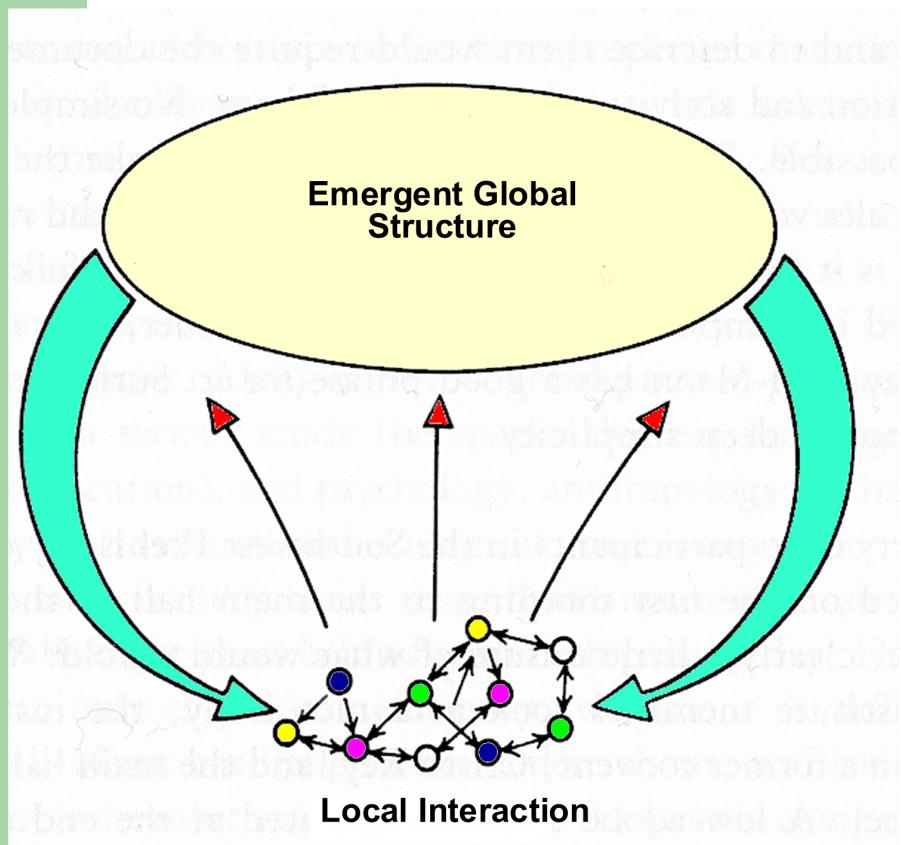
→ Approche expérimentale des SCAA



Auto-organisation et émergence

- De l'interaction des composants individuels émergent des propriétés globales du système
- Ces propriétés ne sont pas prédictibles à partir des propriétés des composants individuels : “le tout est plus que la somme des parties”
- Les propriétés globales rétro-agissent pour influencer les interactions locales

Emergence / Immergence



Non Linéarité

- Les “sorties” (outputs) du système ne sont pas proportionnelles aux “entrées” (inputs)
- Existence d’effets de seuil



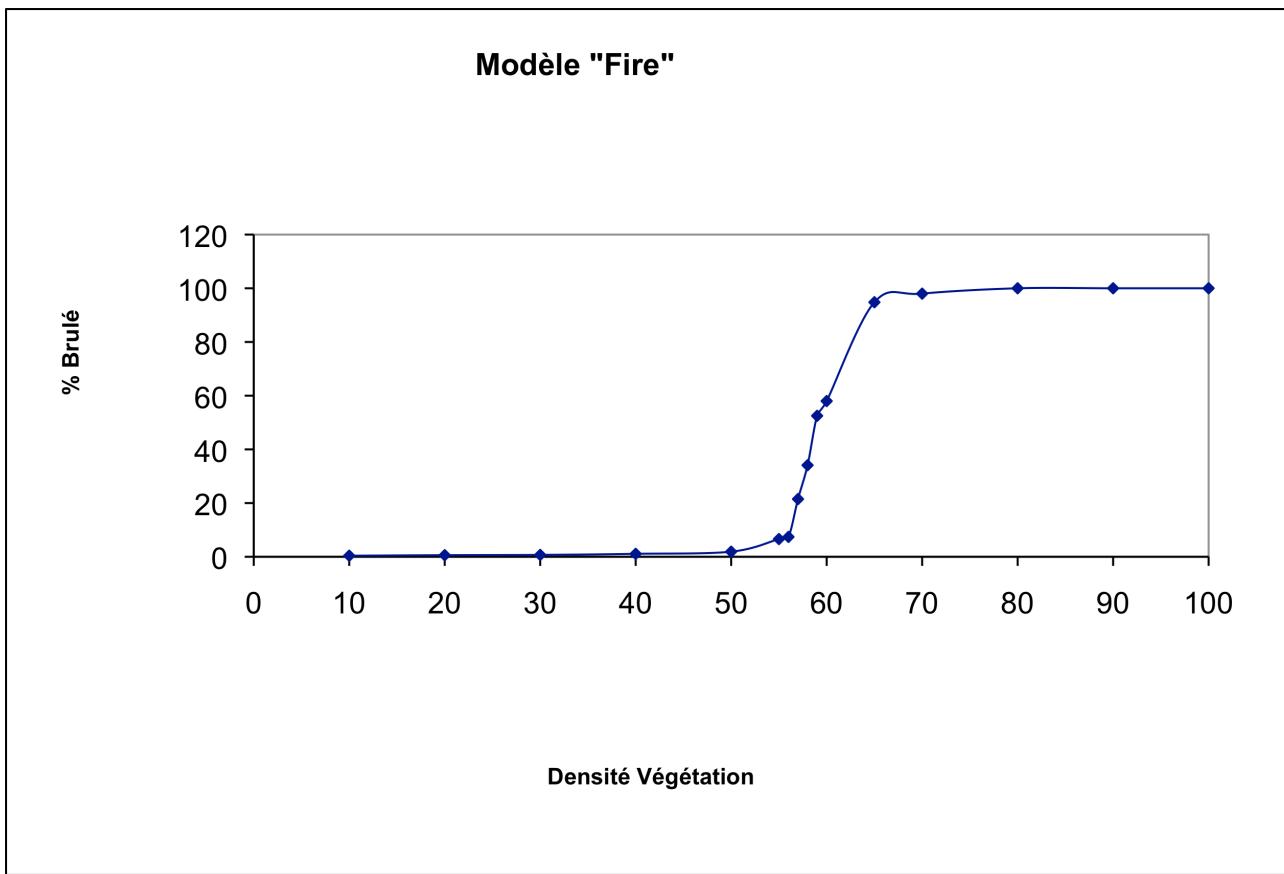
NetLogo : Fire

NetLogo : Fire

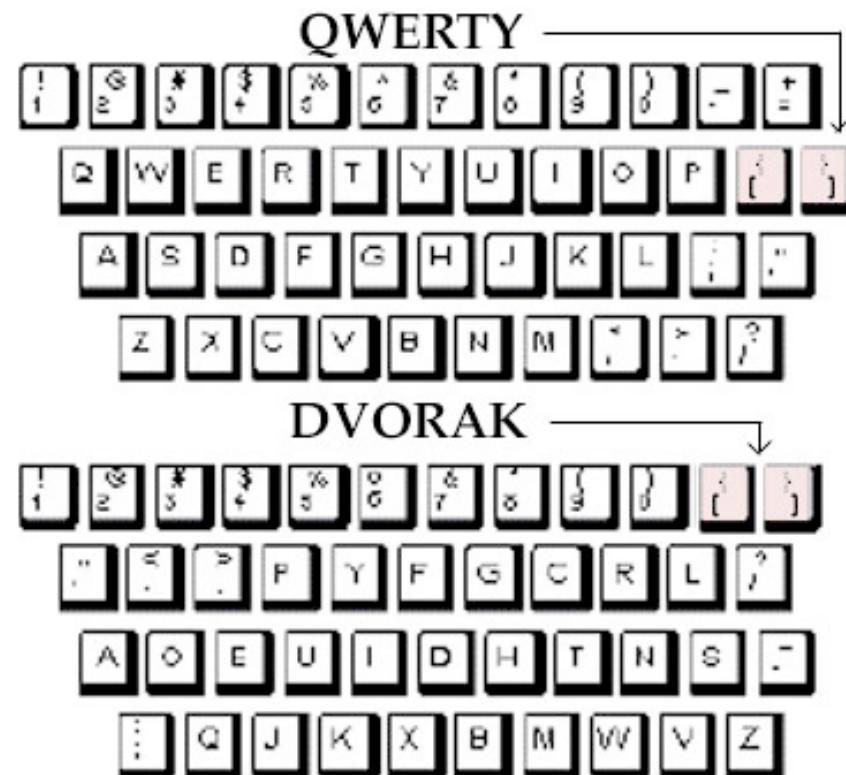




NetLogo : Fire



Rétro-actions positives



La complexité et les sciences sociales

- De nombreux exemples de SCAA dans les sciences sociales
- Comment appréhender ces systèmes ?

Les sciences “dures”

- Les sciences sociales sont ce que Herbert Simon appelle des sciences “dures”
 - Elles ne peuvent pas être segmentées en sous disciplines
 - i.e., économie, géographie, histoire, sociologie, démographie...
 - Dont les analyses pourraient être agrégées pour produire une analyse du système social dans sa globalité
 - Même si les sciences sociales sont exactement organisées dans cet esprit !

Les sciences “dures”

- Contrairement aux sciences physiques et naturelles, l’expérimentation contrôlée est *quasi impossible* dans les sciences sociales
 - Il est difficile de tester des hypothèses concernant les relations entre les comportements des individus et le comportement d’ensemble du système
 - i.e. SI les individus suivent certaines règles, ALORS la société dans son ensemble exhibera certaines propriétés

L'acteur rationnel

- Il est commun dans les sciences sociales d'étudier un acteur rationnel
 - Un individu parfaitement informé, doué d'une capacité de calcul illimitée, qui maximise une fonction d'utilité
 - L'acteur rationnel cherche toujours à optimiser ses actions et agit de manière parfaitement rationnelle
 - Mais...peut de lien avec l'être humain moyen !

La richesse de la réalité comme obstacle

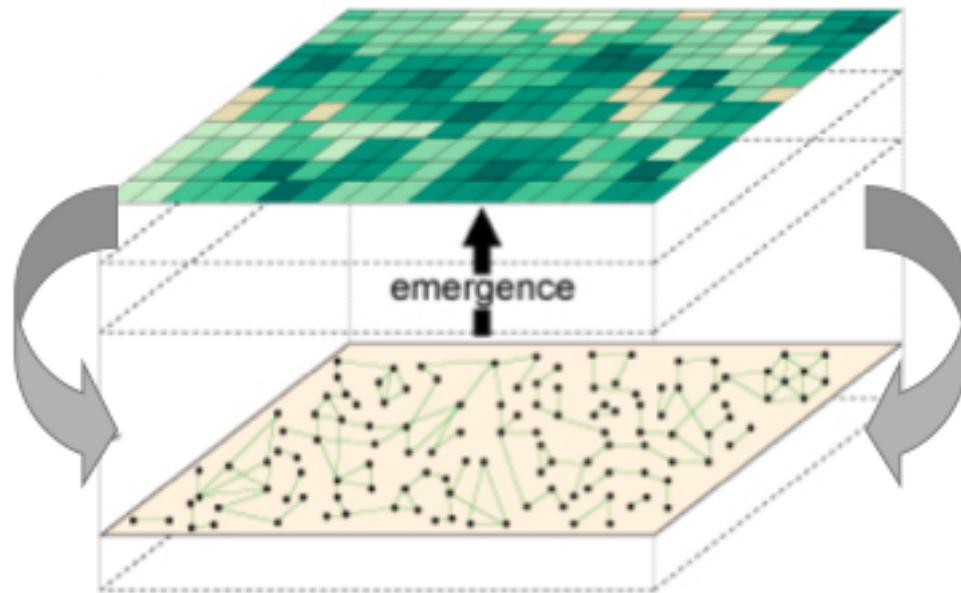
- Une pratique courante des sciences sociales est de supprimer toute l'hétérogénéité du monde réel dans ses modèles
 - Un acteur “moyen”
 - Un environnement simple, parfaitement connu de l'acteur

Evolution des Sciences Sociales



- Rétroactions négatives
 - Basées sur la physique du 19ème Siècle (équilibre, stabilité, dynamiques déterministes)
 - Individus identiques
 - Pas de dynamique puisque tout est à l'équilibre
- Rétroactions positives
 - Basées sur la biologie (structure, processus, auto-organisation, cycles de vie)
 - Individus différents et différenciés
 - Tout change en permanence ! « Life at the edge of chaos »

Systèmes Adaptatifs Complexes



Actions locales non coordonnées
mais interdépendantes
→ Emergence de structures globales

Interactions...



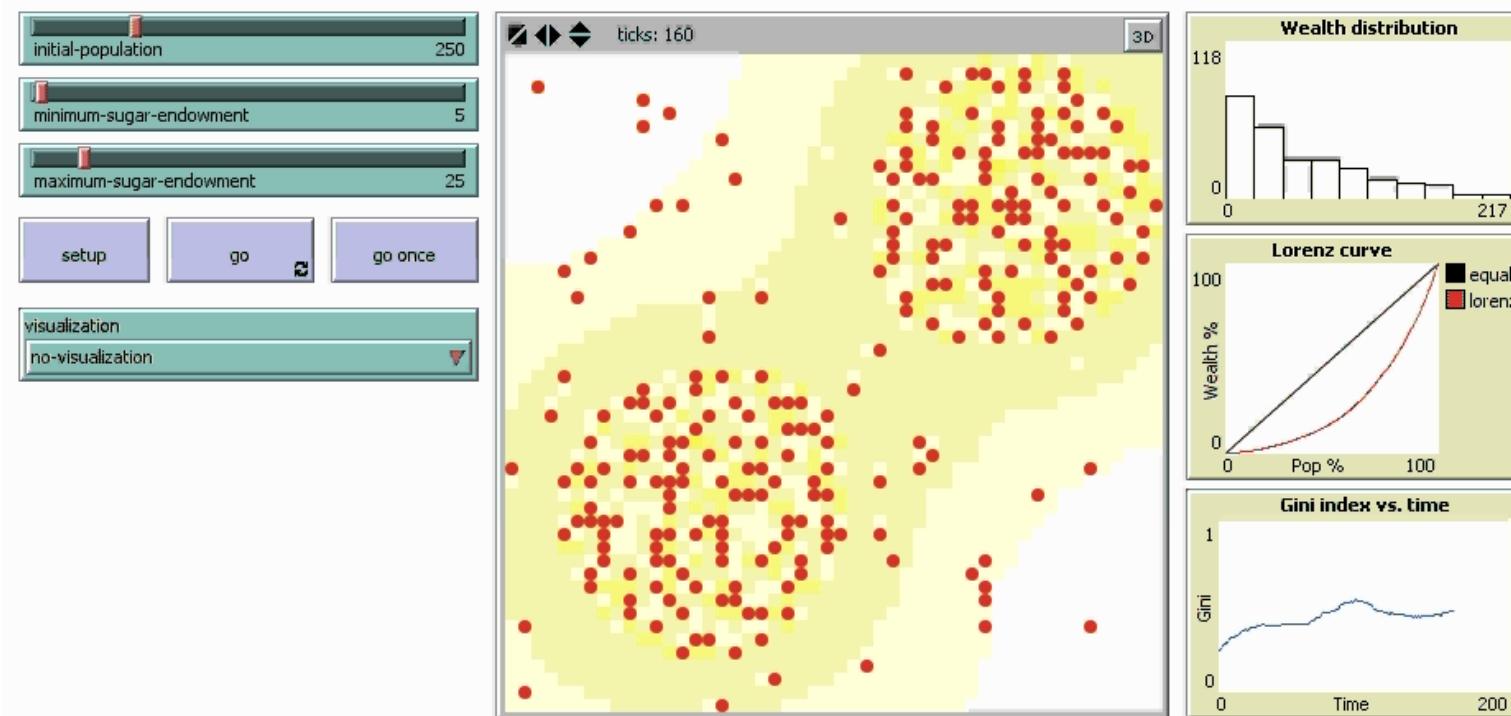


8

Individuel VS Collectif



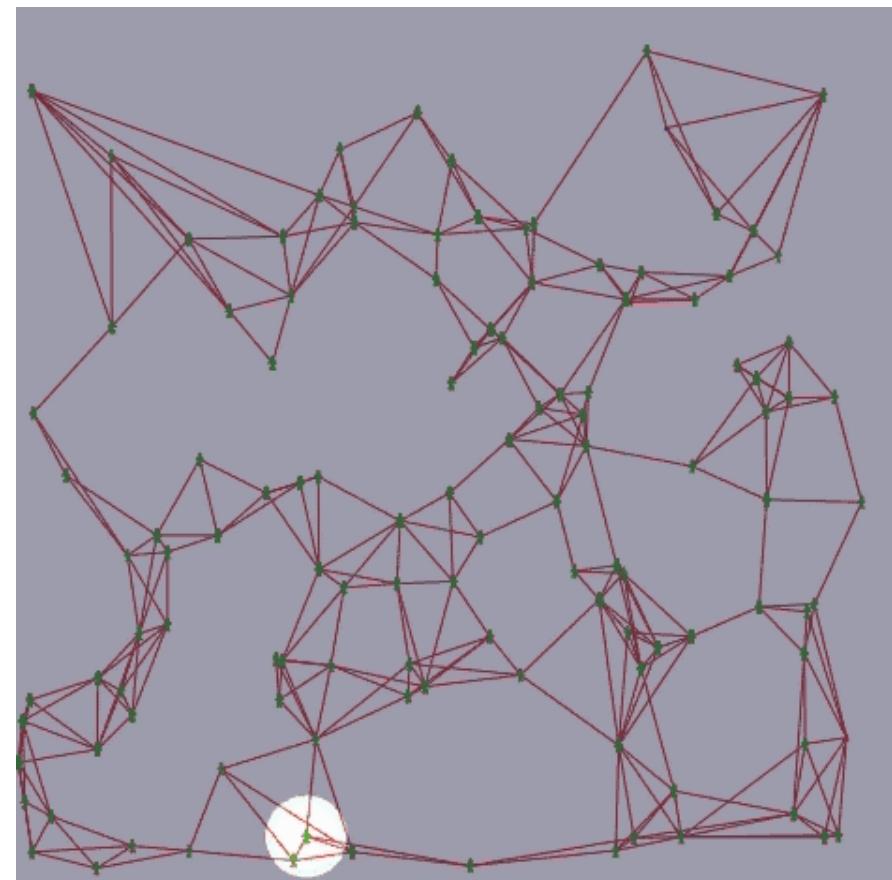
Sugarscape



Agents homogènes mais conditions initiales différentes
(inégalités horizontales) ==> « path dependance »

Réduisons les « inégalités horizontales »

- Système fermé
- Budget initial identique
- Pas d'endettement
- Echange au hasard (1 unité) entre agents interagissant localement



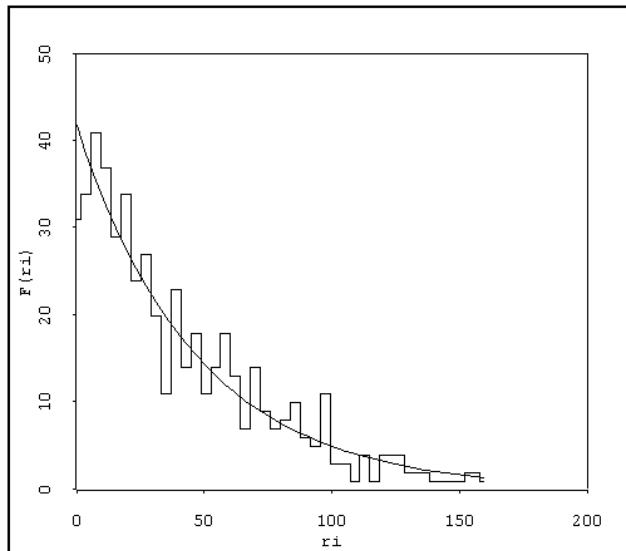
Distribution finale de la richesse ?



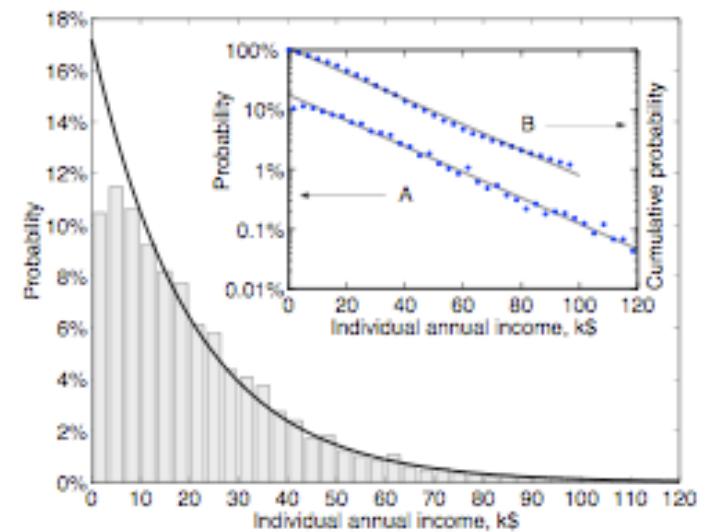
Distribution finale de la richesse

Boltzmann-Gibbs

$$P(r_i) = Ce^{-\beta r_i}$$

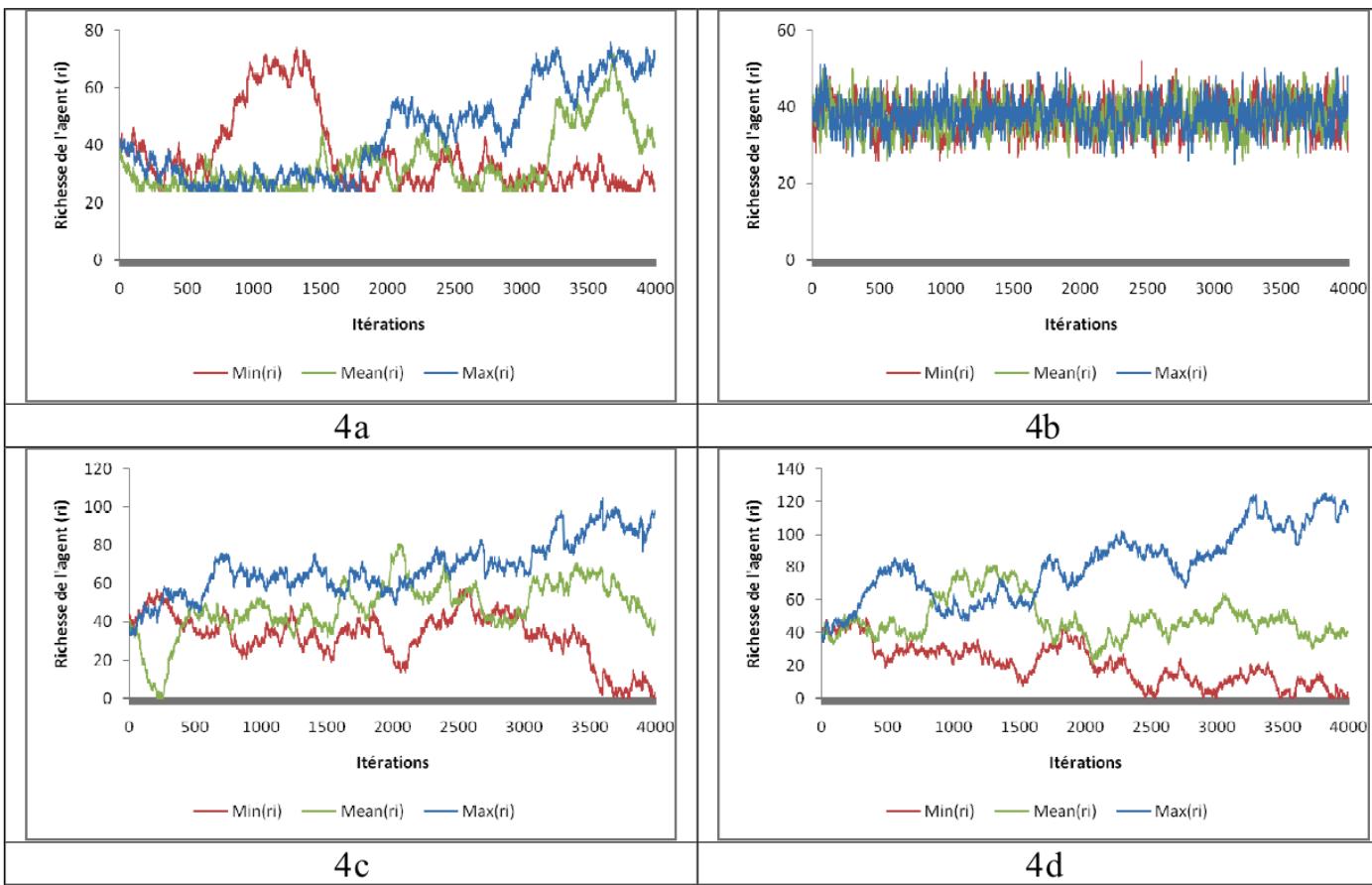


4000 iterations
($n = 500$; $R = 20000$; $C = 3073$; $\beta = 0,02$; $R= 0,88$)

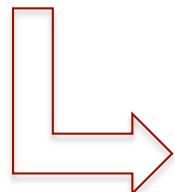
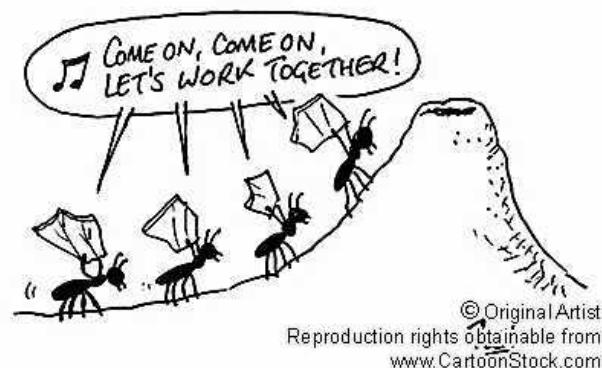


US data, 1996
[Dragulescu & Yakovenko, EPJB, 2001]

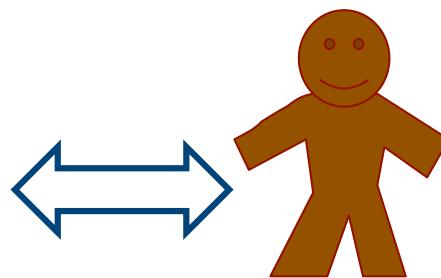
A quoi ça sert ?



Compétition, Coopération, Coopétition



Qu'est ce qu'un agent ?



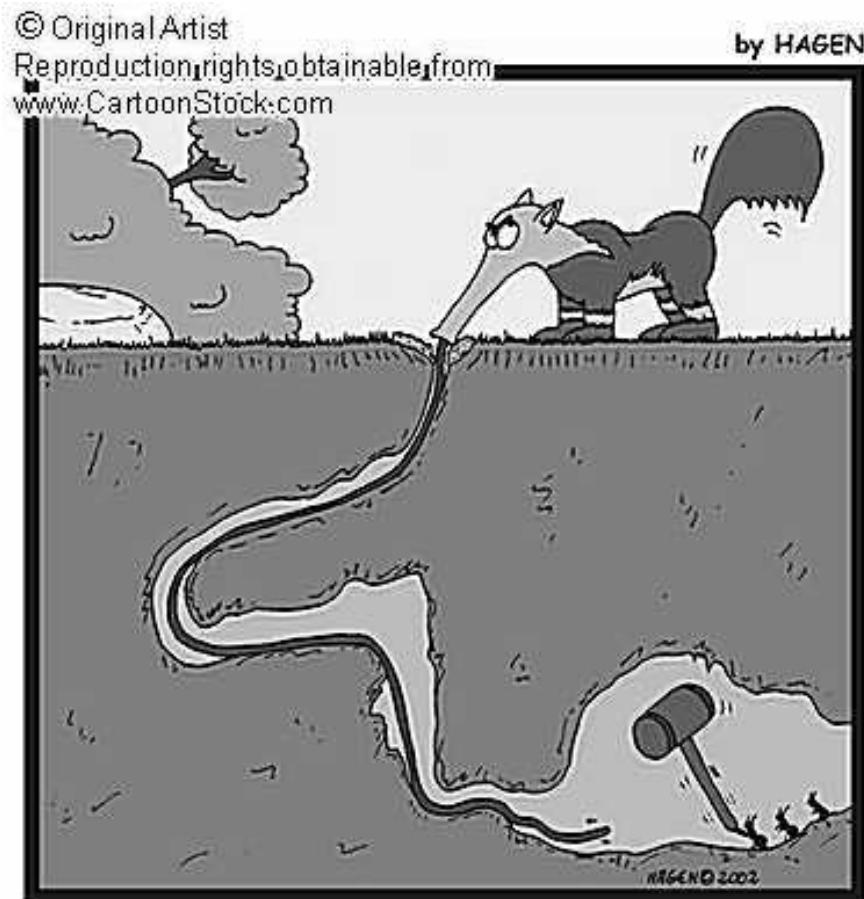
Structure Interne

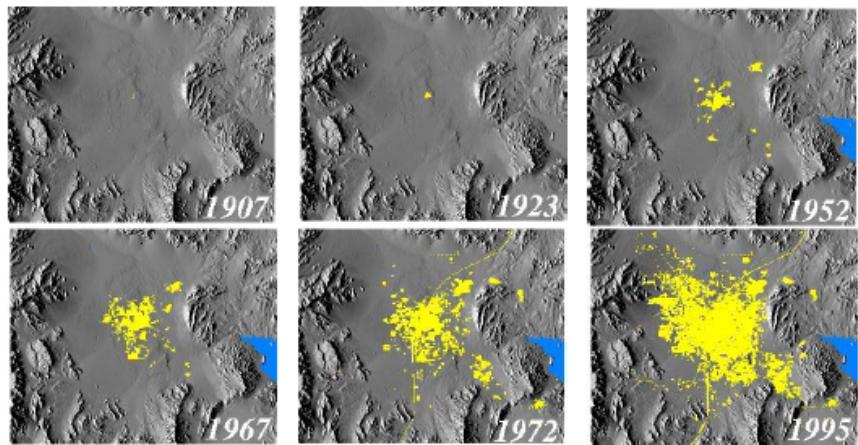
- Autonomie
- Degré de Liberté

Capacité d'action localisée

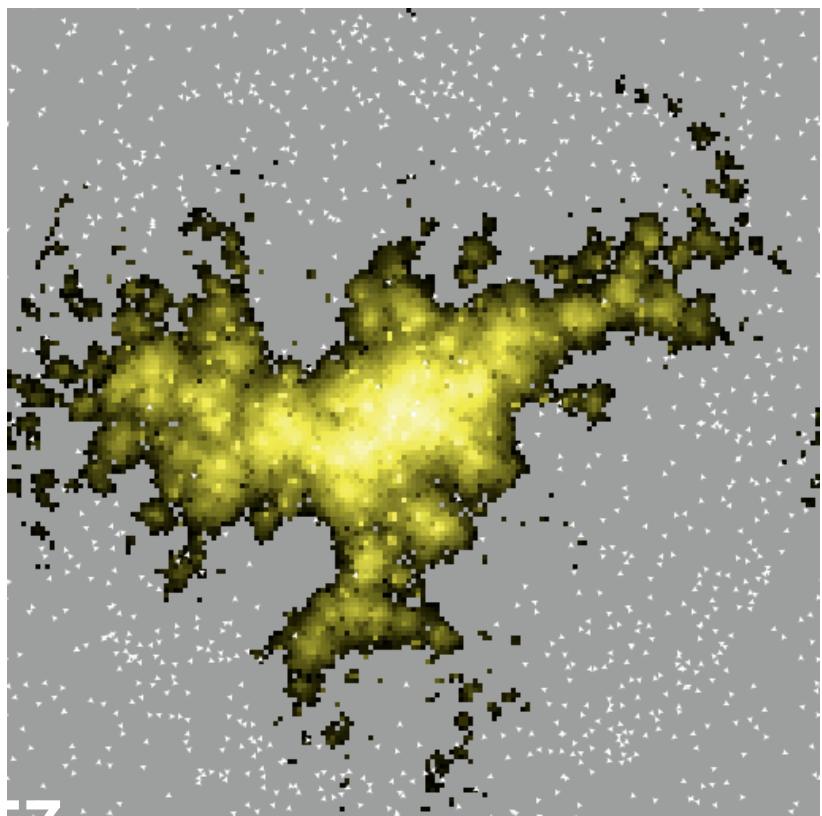
- Réactivité (Capteurs)
- Pro-activité

Des modèles pour explorer

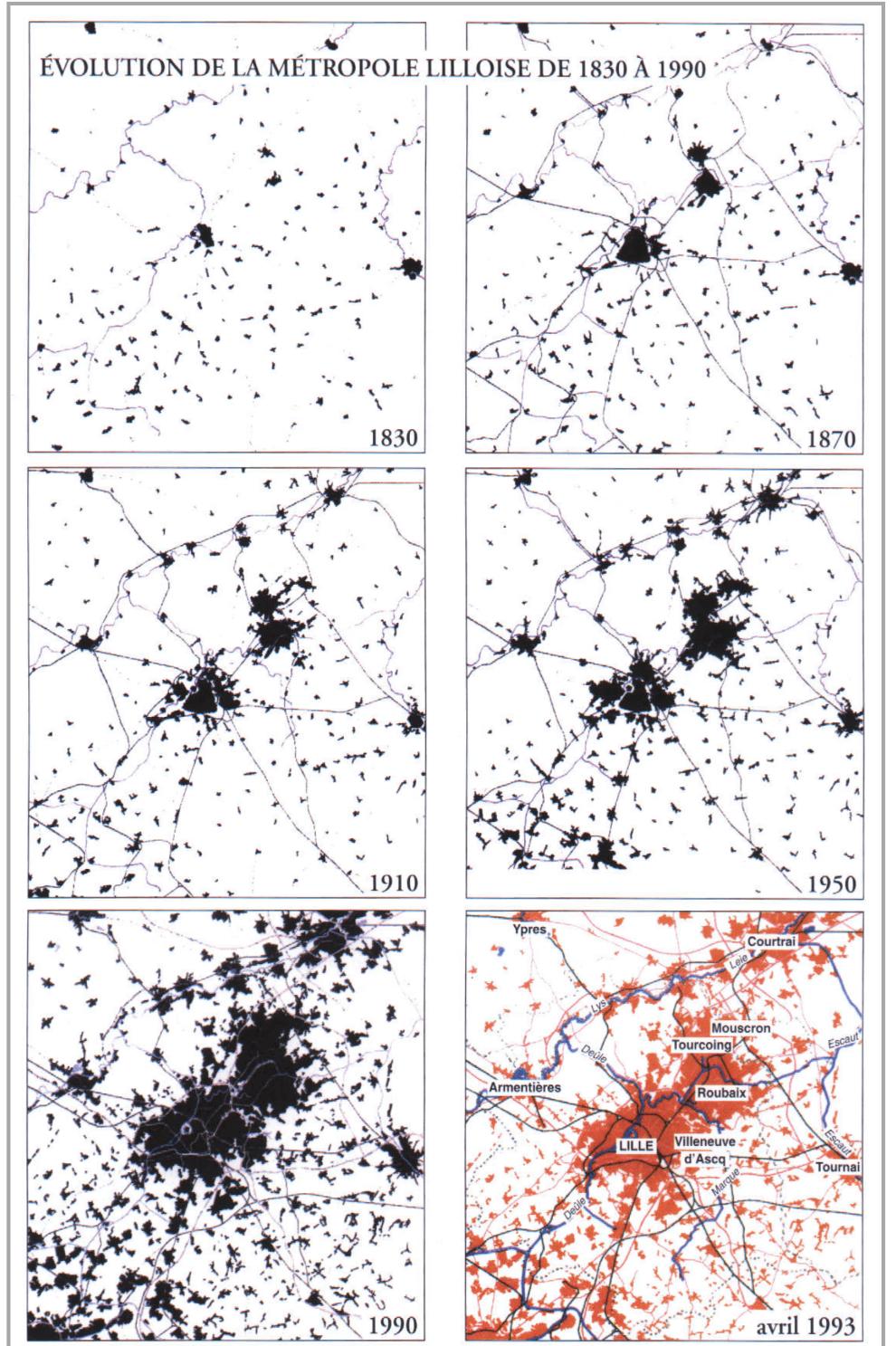




*Figure 1: The Growth of Las Vegas from 1907 to 1995
(from Acevedo et al., 1997)*

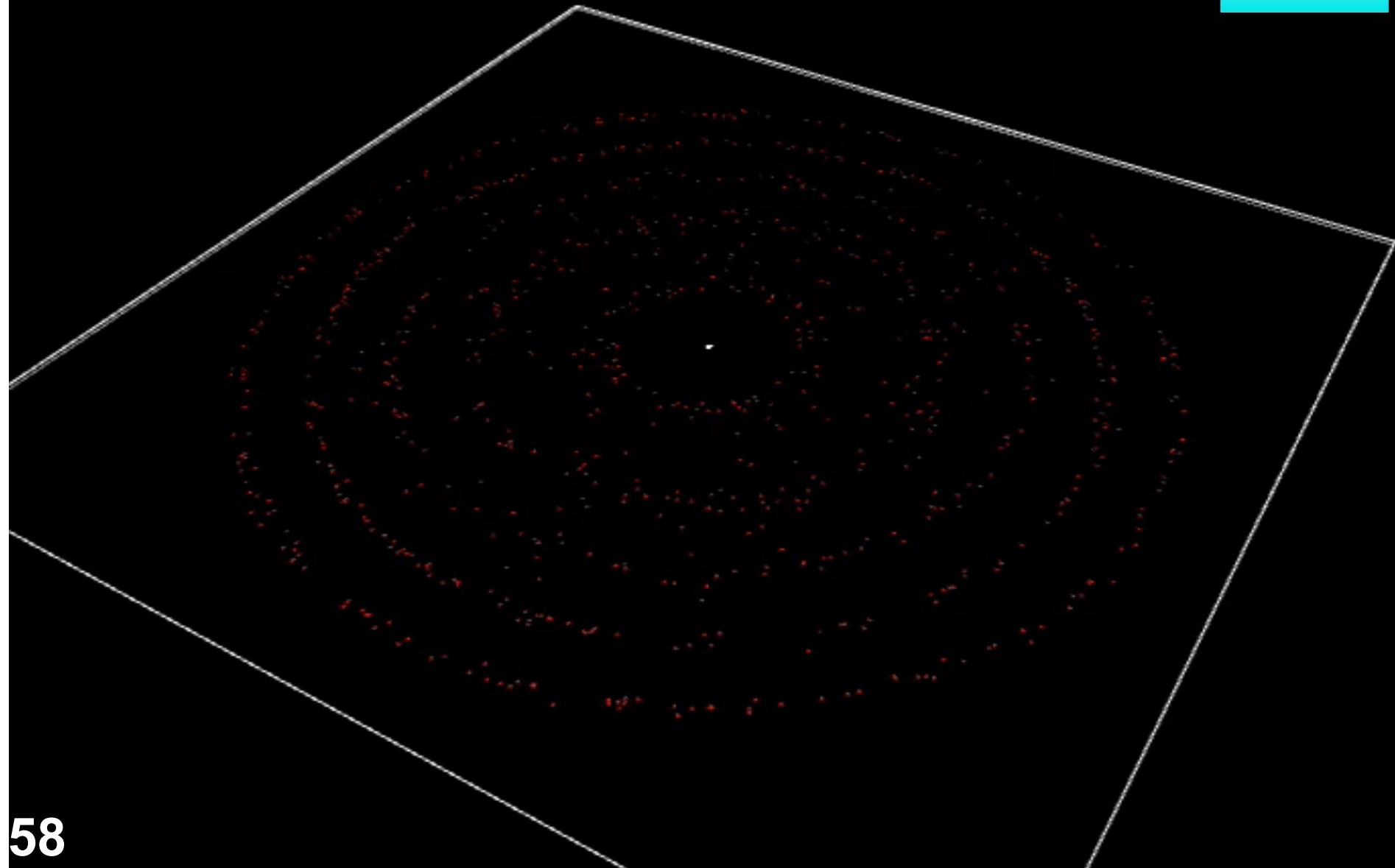


Percolation + Agrégation limitée par diffusion





11





Le modèle de Schelling

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	#	#	#	#	○	○	○	
2	#	#	#			○	○	○
3	#	#			○	○	○	
4	#	#	#	○	○	○	○	○
5	#	#	○		○		○	
6	#	○		○			○	
7	○		○		○		○	#
8		○			○	#	#	

FIGURE 1.5b A highly segregated city.

$$U_i = \begin{cases} 0 & \text{if } P_{ij} > \lambda \\ 1 & \text{if } P_{ij} \leq \lambda \end{cases}$$

Avec P_{ij} la proportion de voisins occupés de couleur différente.

Si $U_i = 0$, l'agent A_i cherche à déménager vers une place libre lui permettant d'accroître son utilité ($U_i = 0 \rightarrow U_i = 1$).



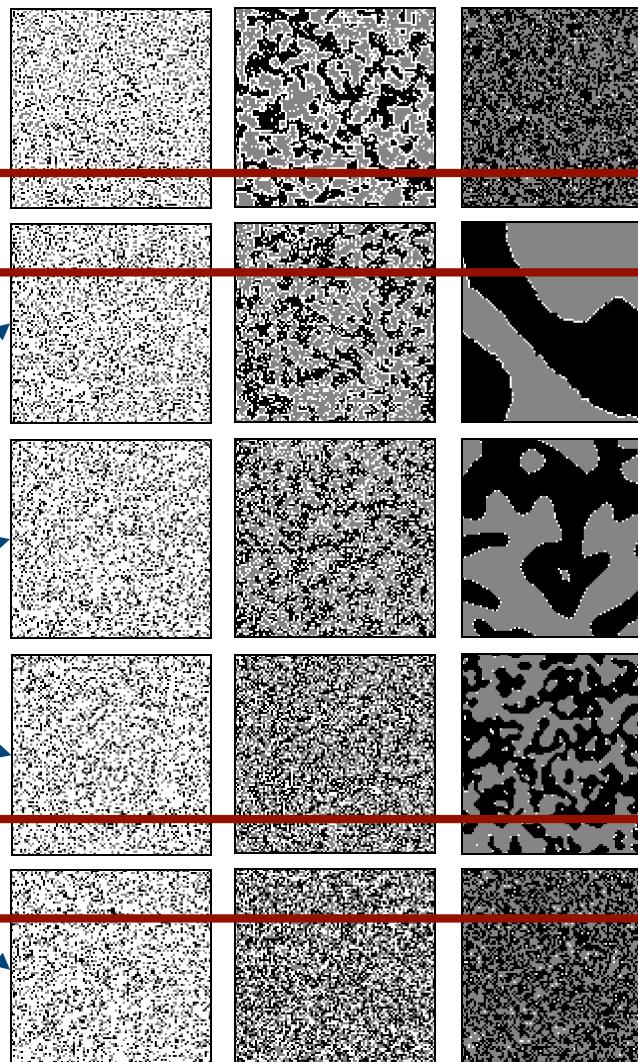
Densité d'agents

« Dynamically frozen state »

(Gauvin, Vannimenes, Nadal,
2009)

Equilibre

$d = 30\%$ $d = 66\%$ $d = 98\%$



Daudé & Langlois, 2007

$\lambda = 20\%$

$\lambda = 30\%$

$\lambda = 40\%$

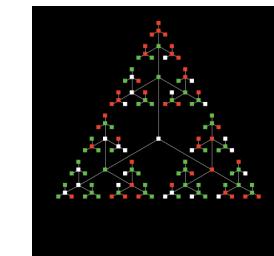
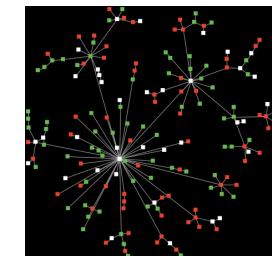
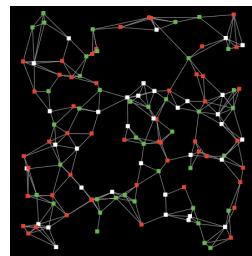
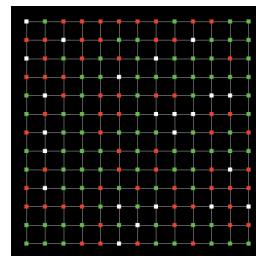
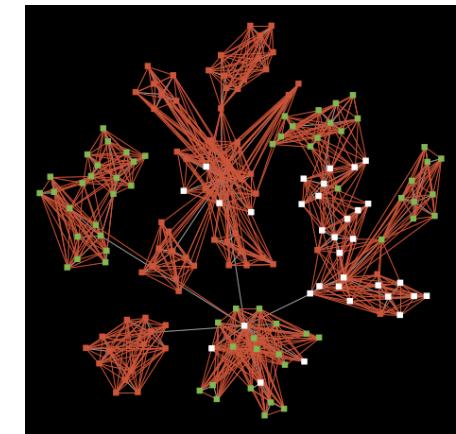
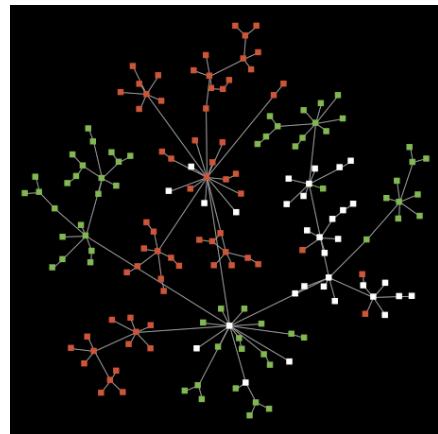
$\lambda = 60\%$

$\lambda = 80\%$

Tolérance



Un peu de cliques ?



$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$$

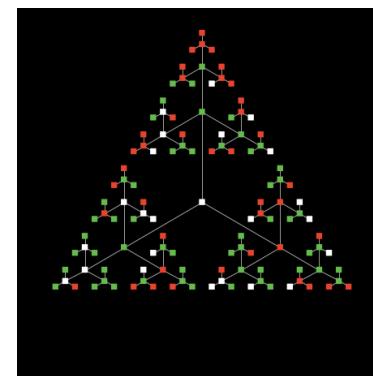
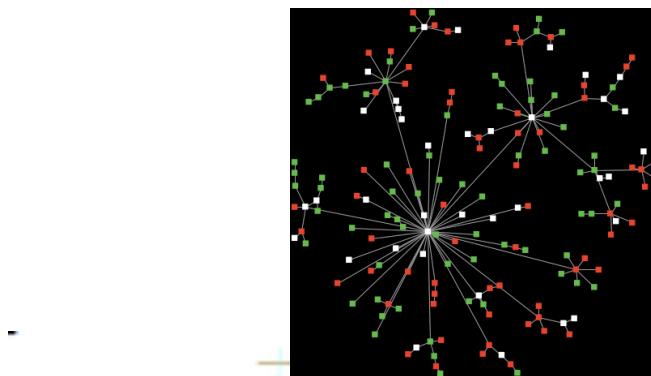


$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)}, \quad 0 \leq C_i \leq 1$$

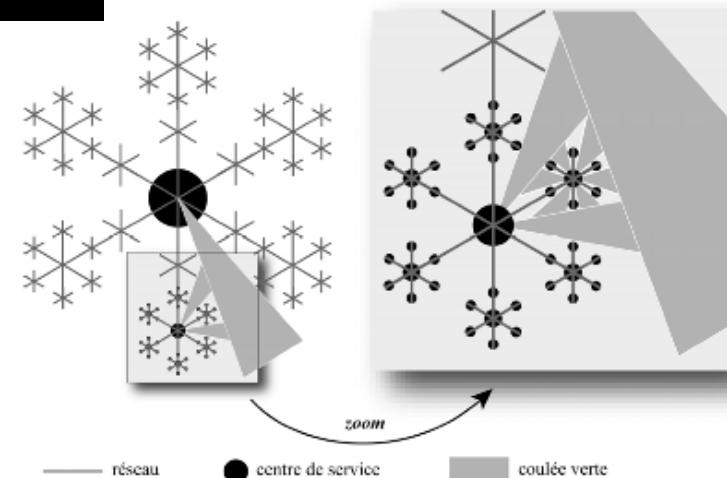
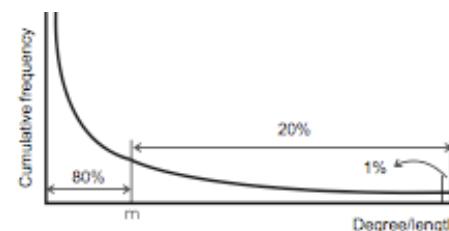
	Grid	Random	Scale-Free	Sierpinski
#Nodes	361	361	361	363
#Edges (structural graph)	1332	1448	360	364
„Erdos (neighboring graph)	2039	1749	1960	2134
Cliques (neighboring graph)	0.55	0.65	0.99	0.95

E_i = nb de liens entre les voisins et k_i = nb de voisins

Réseaux étranges ?



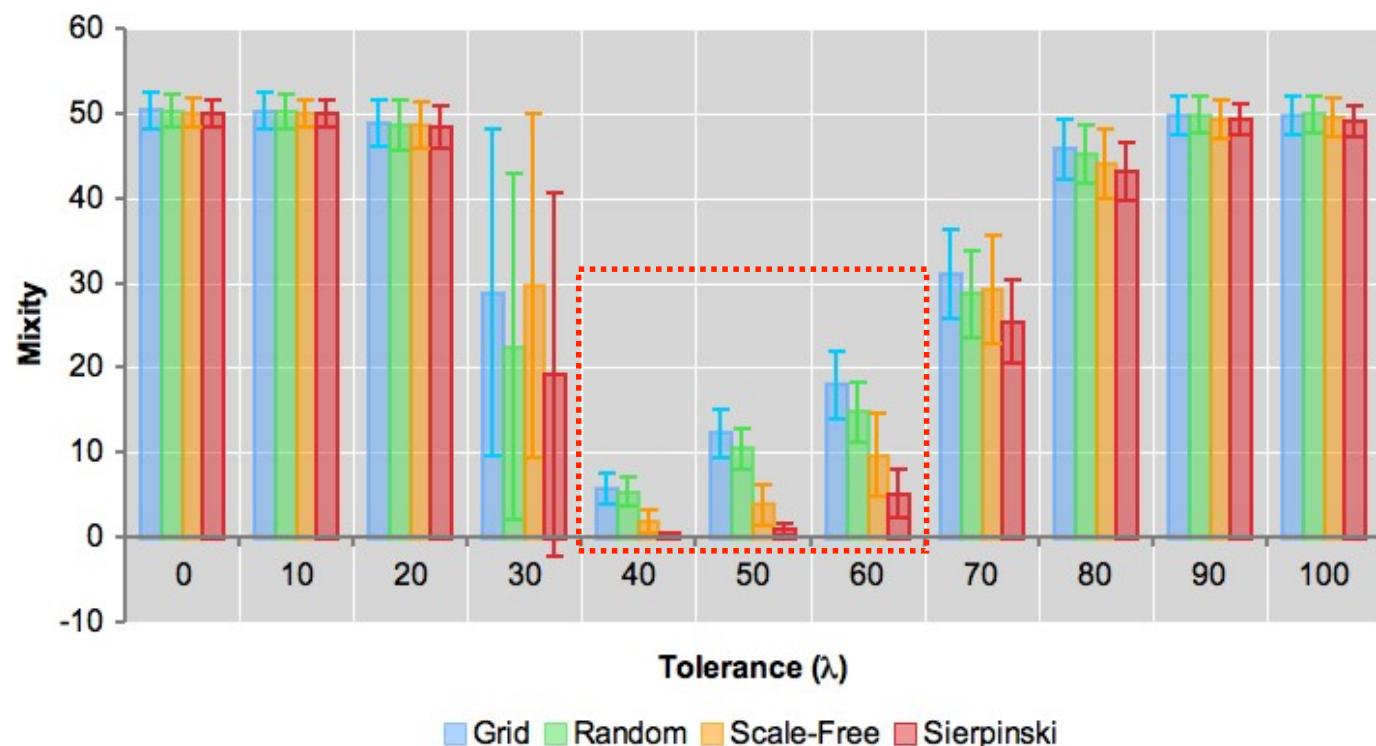
Bin Jiang, 2007



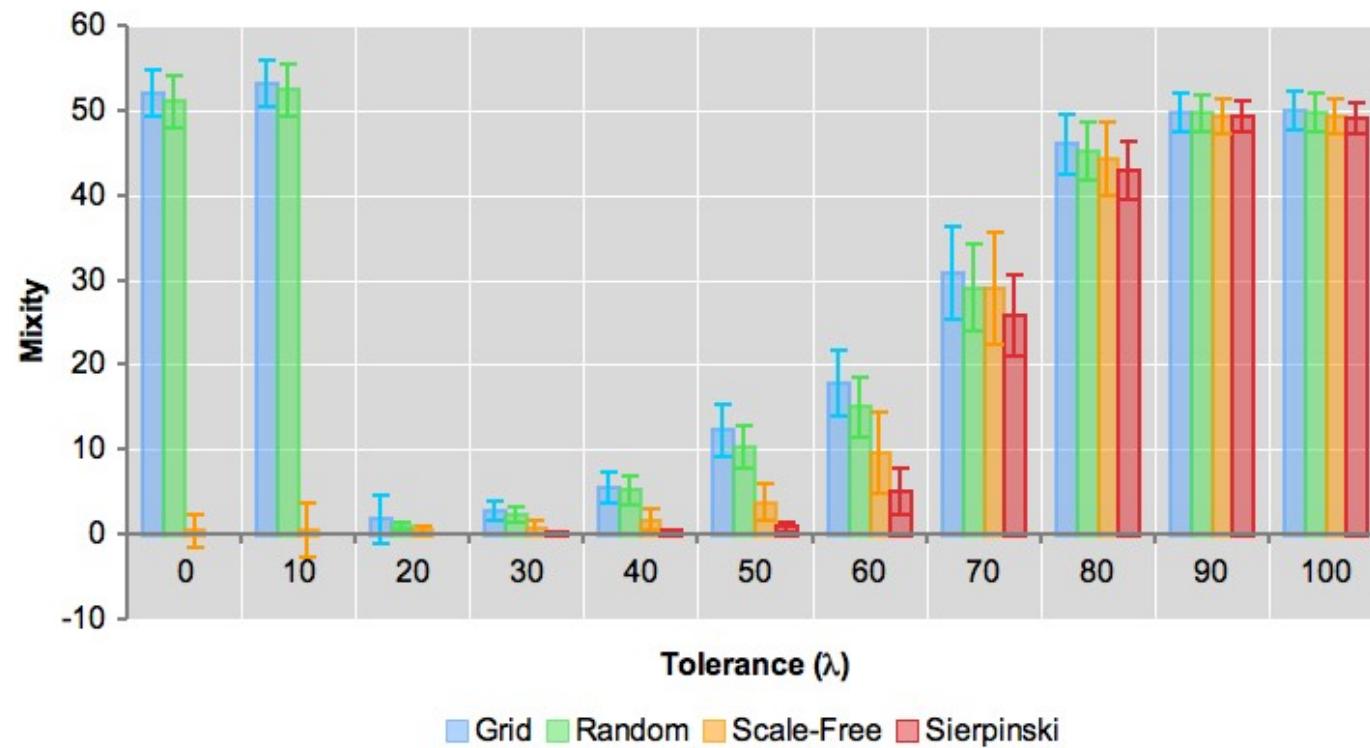
Frankhauser et al., 2007

Effet de clique

$$M = \frac{1}{|A|} \sum_{i=1}^{|A|} P_{ij}$$

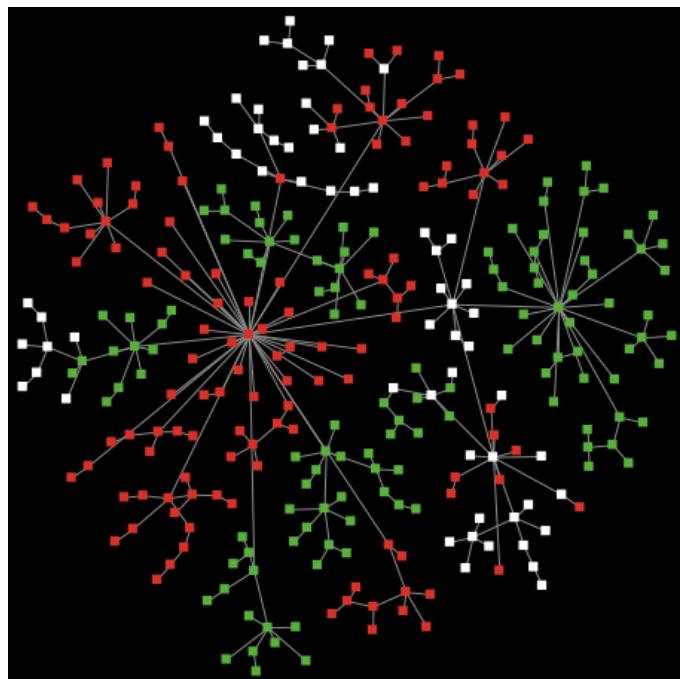


Un peu d'huile dans les rouages

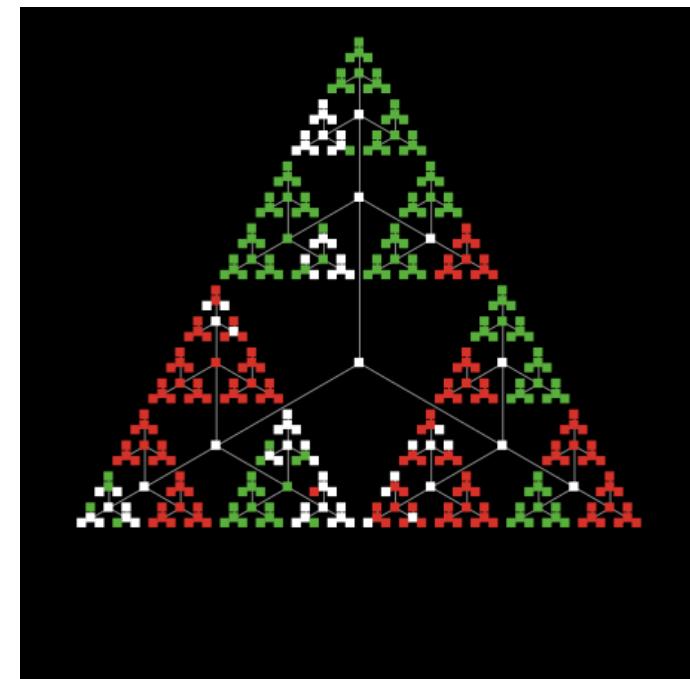


Des cliques aux trappes

Scale-Free
(preferential Attachment)

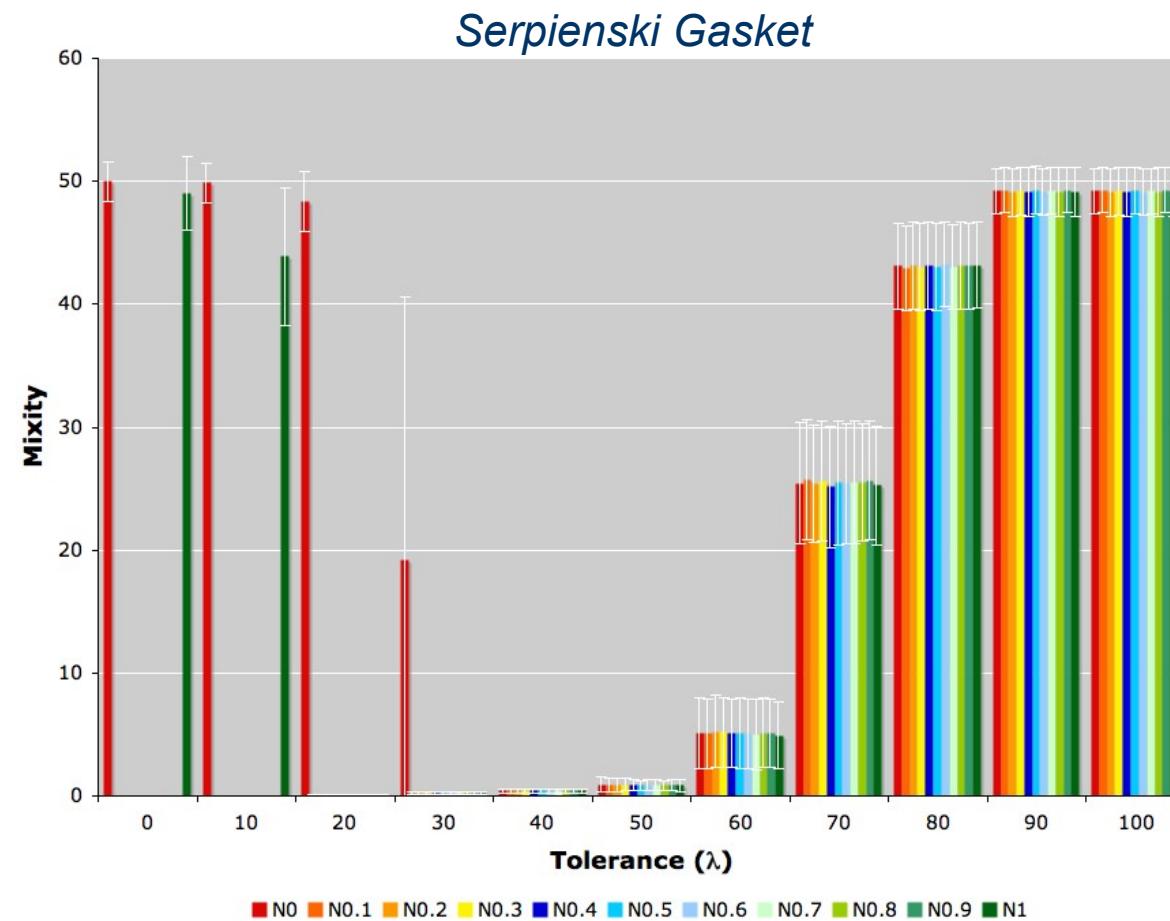


Serpienski Gasket

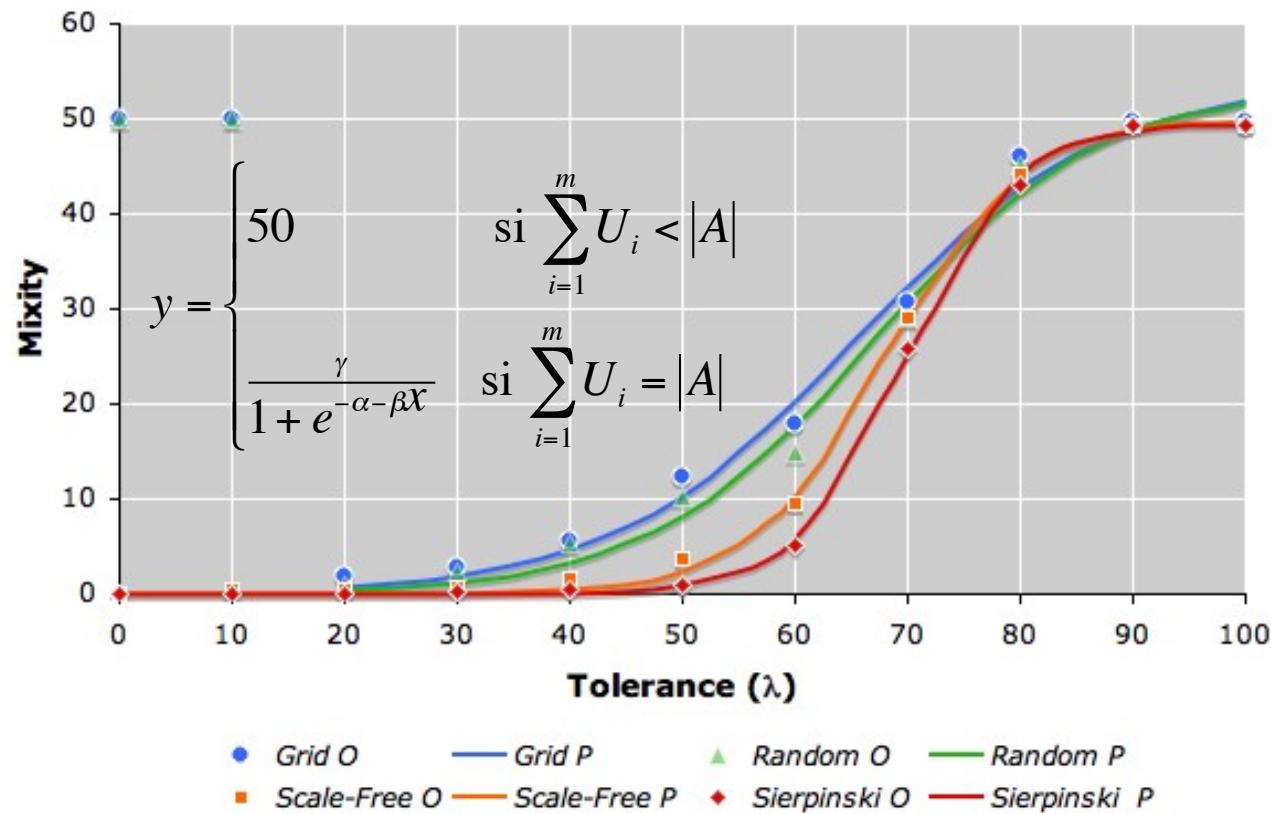


Density= 80%, tolerance = 20%, Neighbours = 10, N=0.1

Action ciblée du bruit

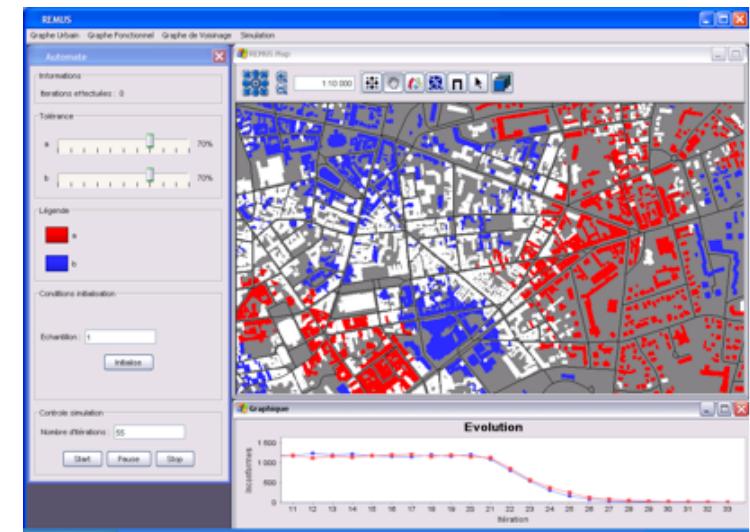
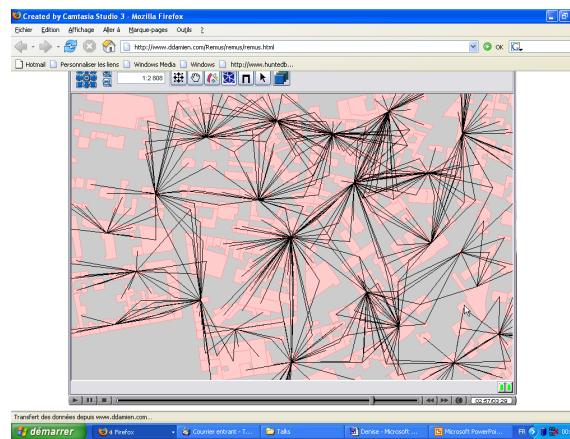
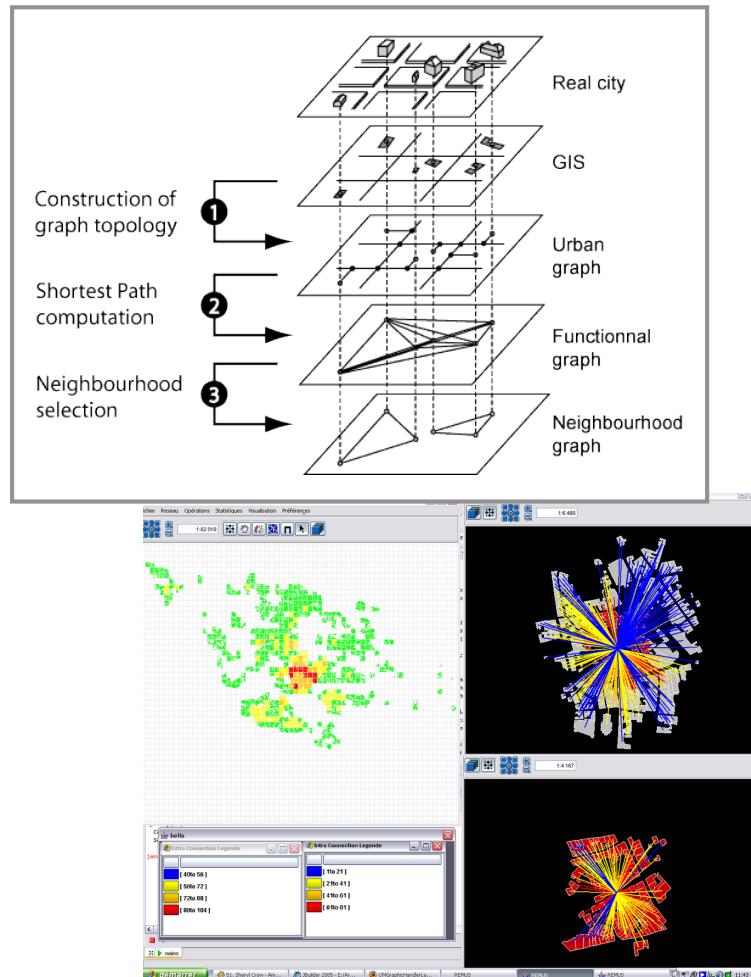


Les cliques renforcent la dynamique ségrégative

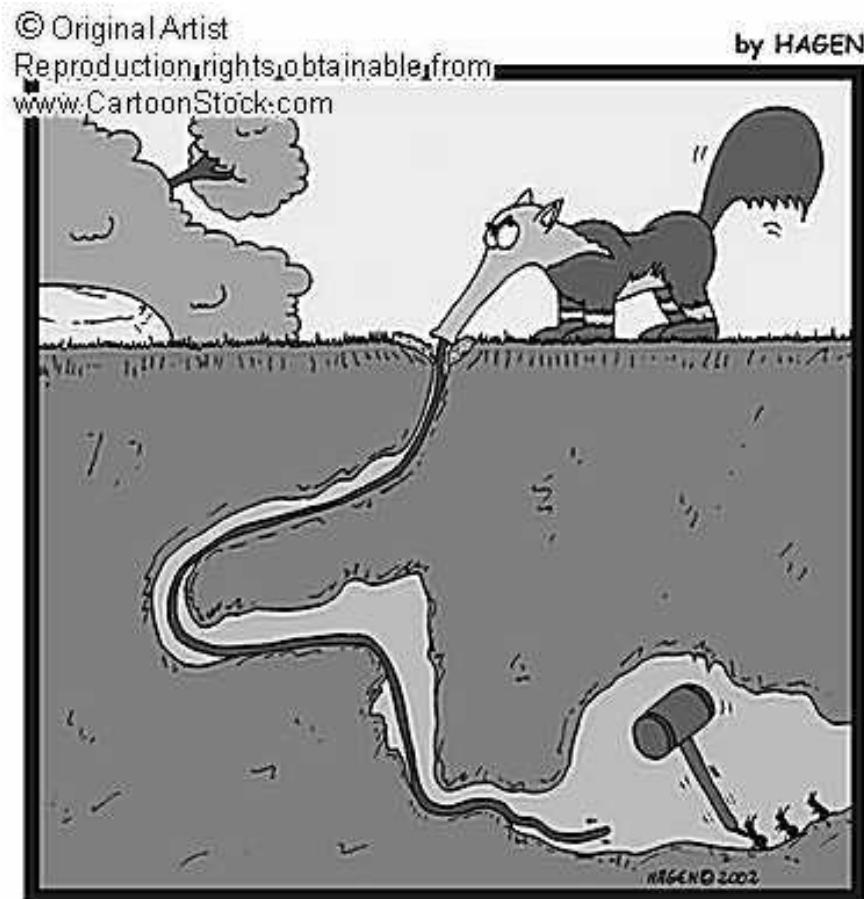


REMUS

(D.Moreno, Pau & D. Badariotti UDS)



Des modèles pour prédire ?





Tokyo

Pas de coordination dans le métro ?



Des piétons à la foule



Modèles physiques

- « Social forces » model (D. Helbing)

$$\frac{d\vec{v}_i^t}{dt} = \frac{1}{\tau_i} \vec{v}_i + \vec{F}_i^t + \varepsilon$$

$$\vec{F}_i^t = \sum_O \vec{F}_{Oi}^t(\theta_i^t, l_i^t - l_O) + \sum_j \vec{F}_{ji}^t(\theta_i^t, l_i^t - l_j^t) + \sum_k \vec{F}_{ki}^t(\theta_i^t, l_i^t - l_k^t, T)$$

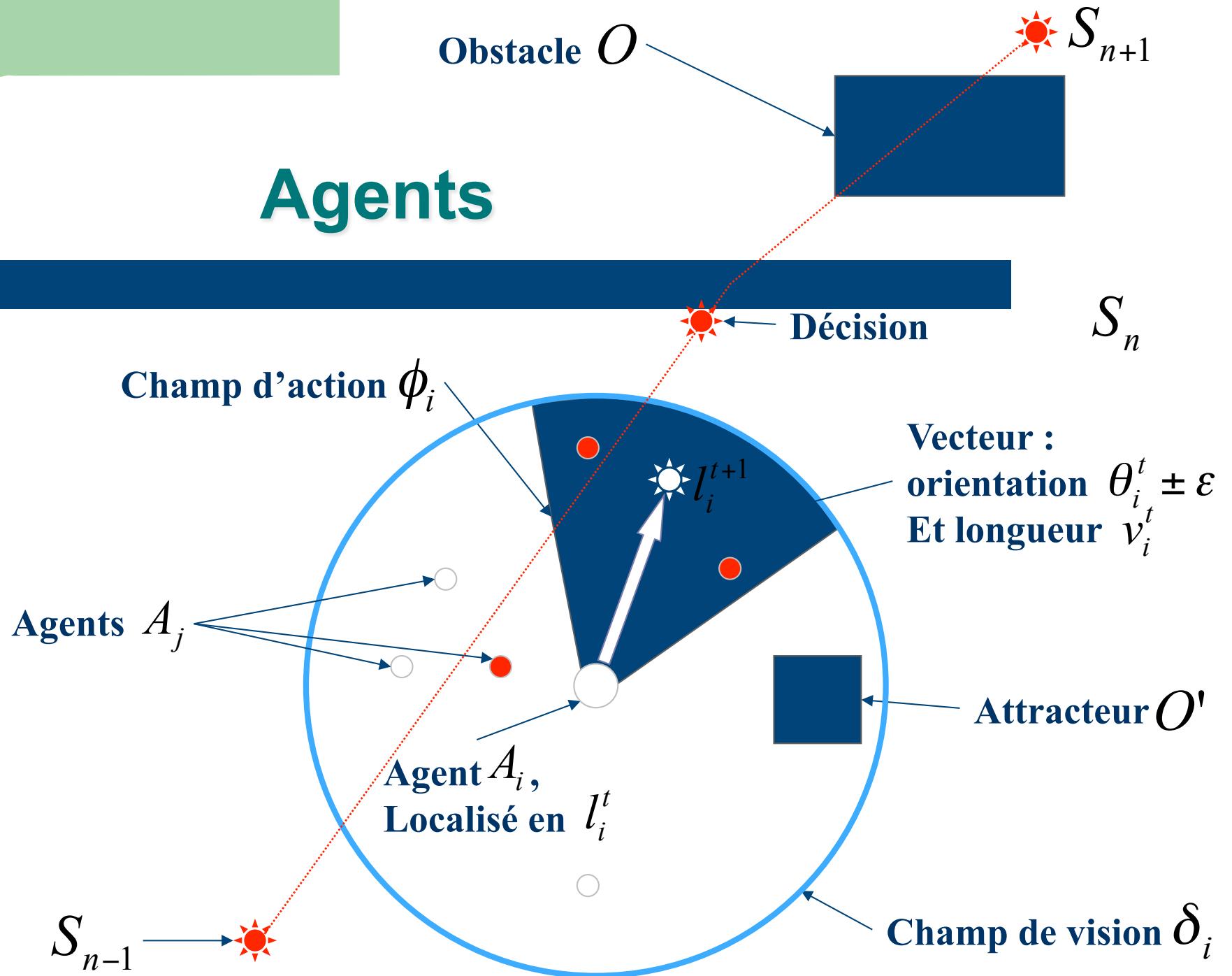
Obstacles

Autres agents

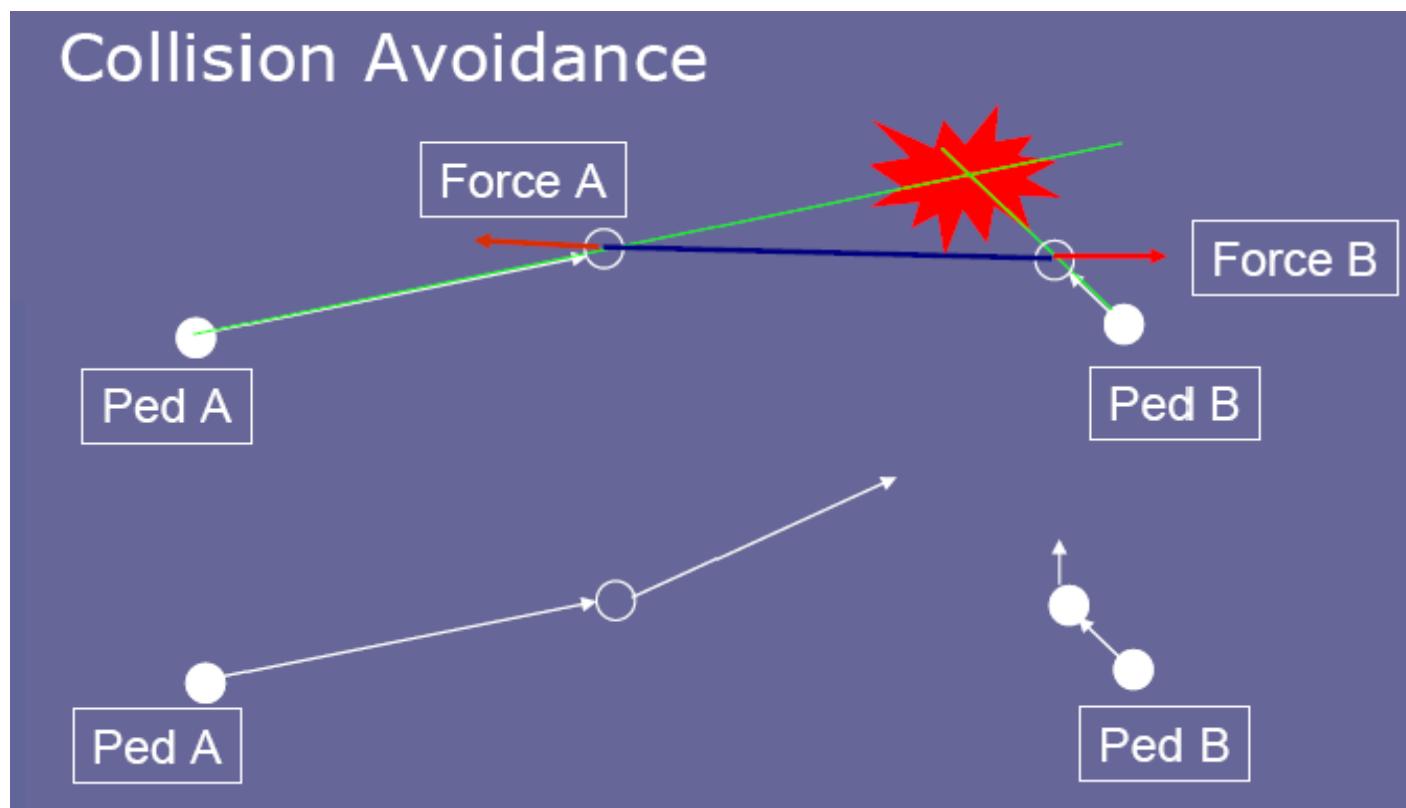
Attraction

Répulsion

Agents

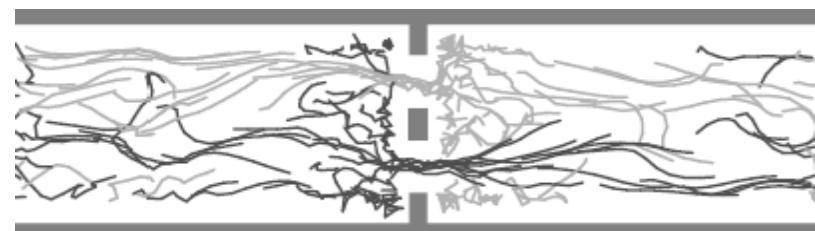
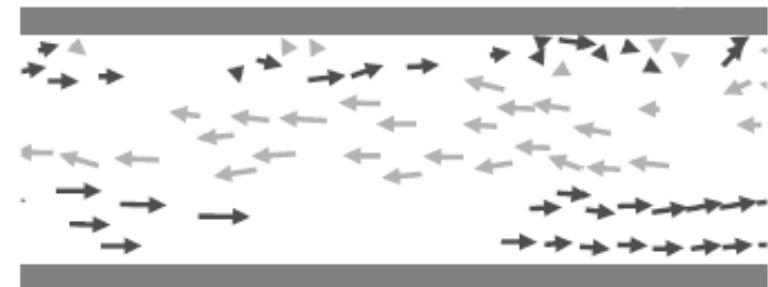


Ex : Evitement de collision

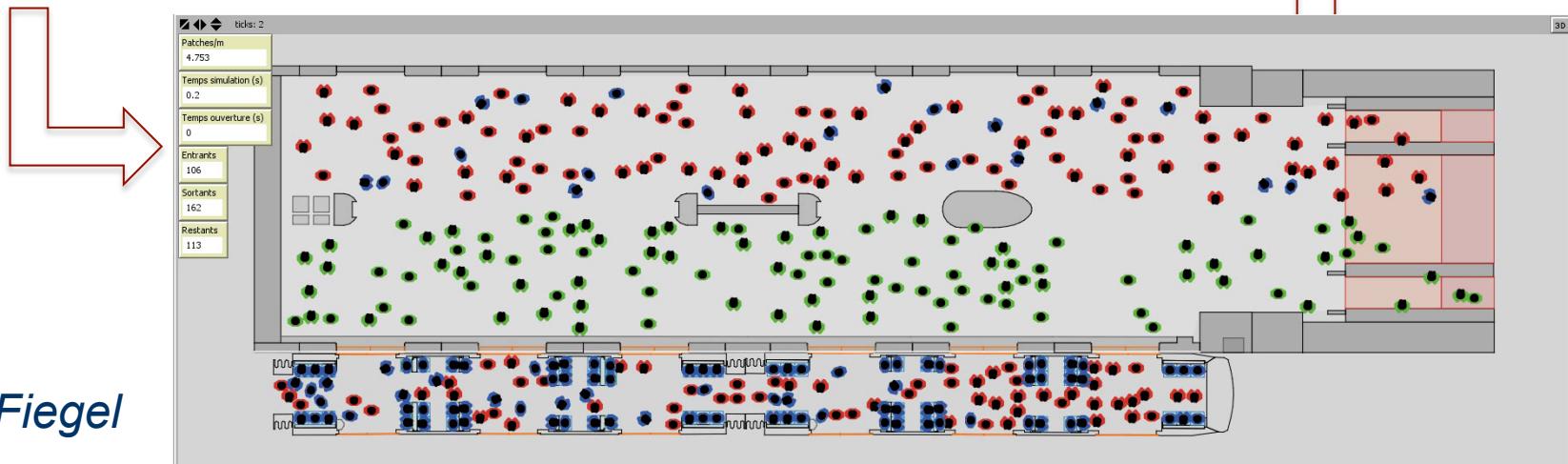


Emergence de files

(Helbing, Molnar, Farkas, Bolay, E&P B, 2001)



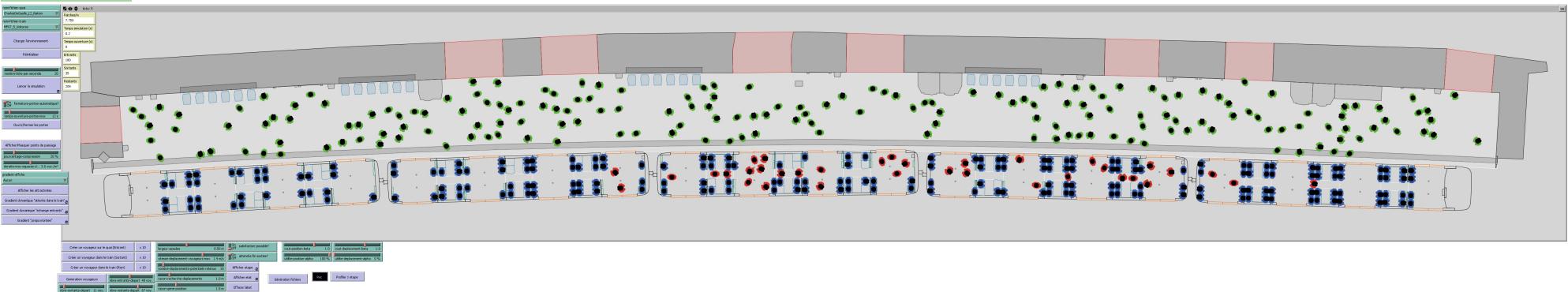
Echanges quais-trains



Aide à la décision :

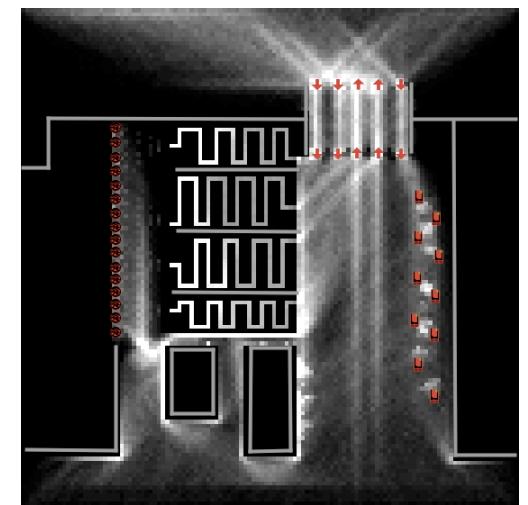
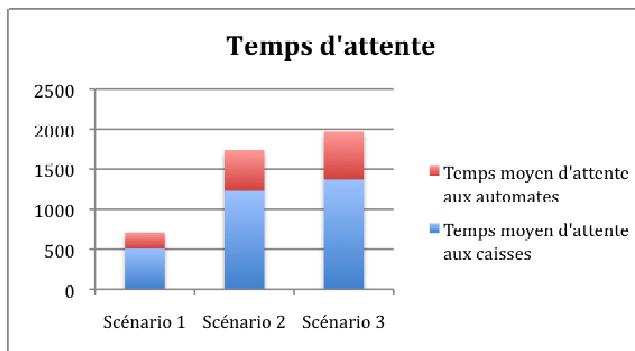
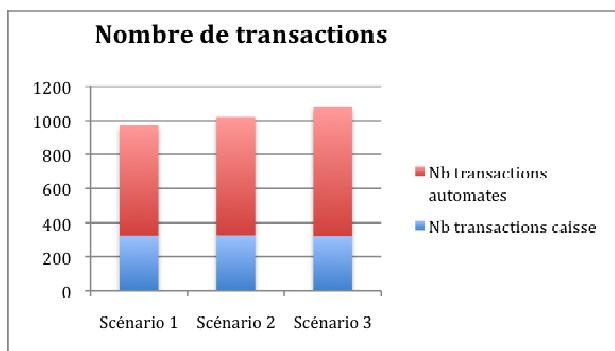
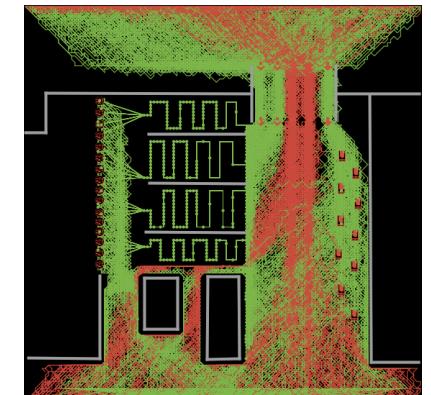
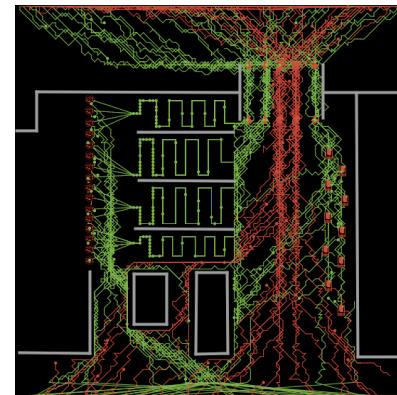
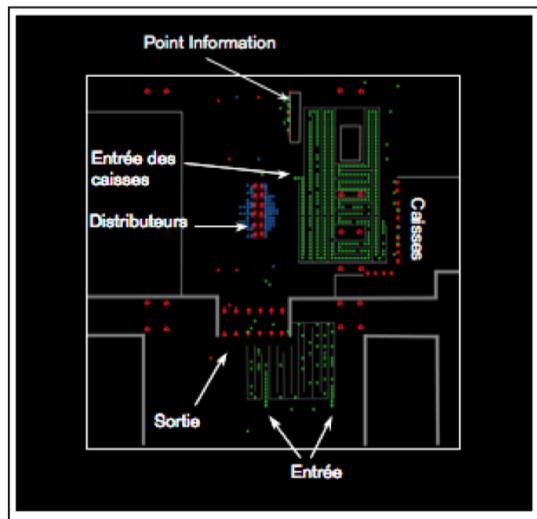
- Régulation du trafic
- Investissements (trains)
- Equipements (train, quais)

Train entier



Architecture

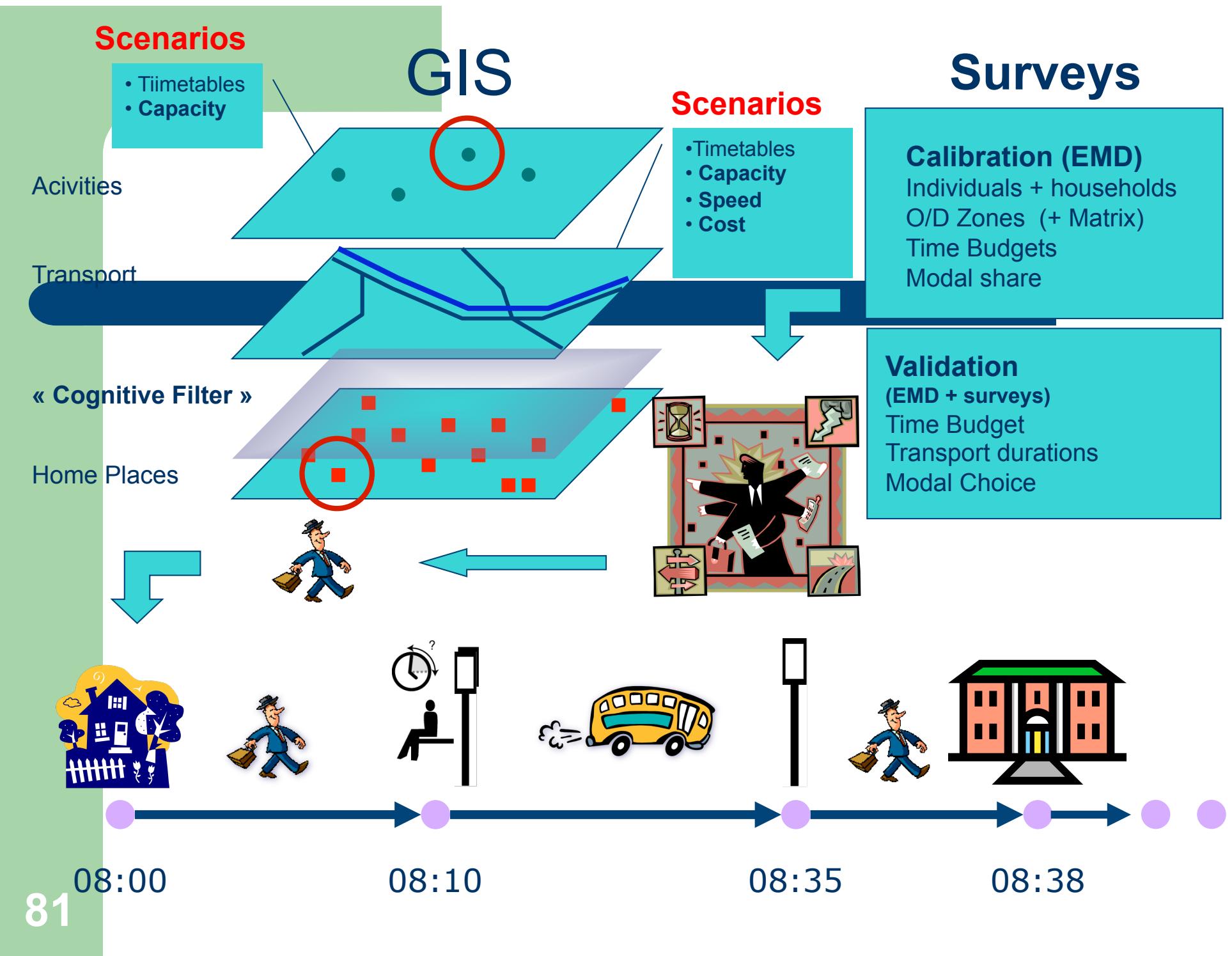
(ReadyMade Networks)



Projet de ré-aménagement de la Cité des Sciences
[Banos, Tazdaït, 2008]

Elargissons le problème...



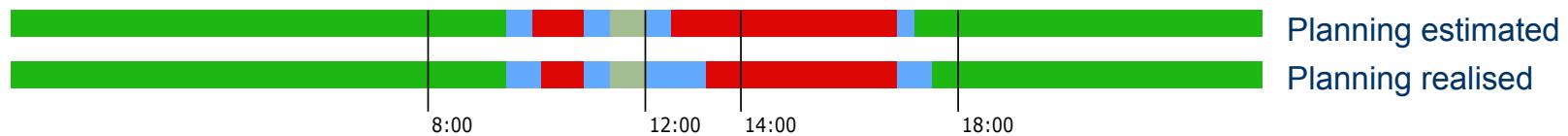


Ajoutons autonomie et évolution

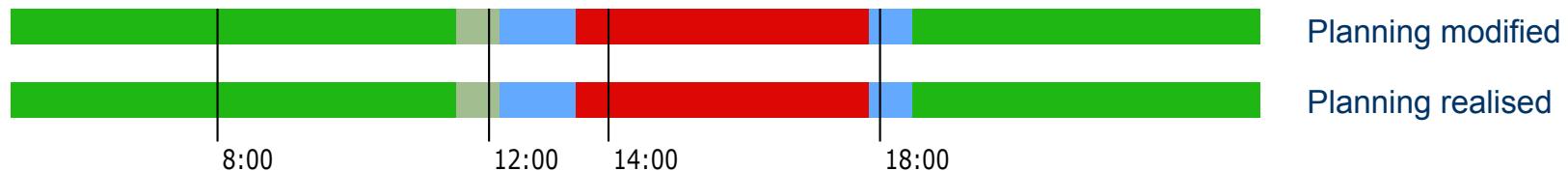


Evolution des emplois du temps

Day 1

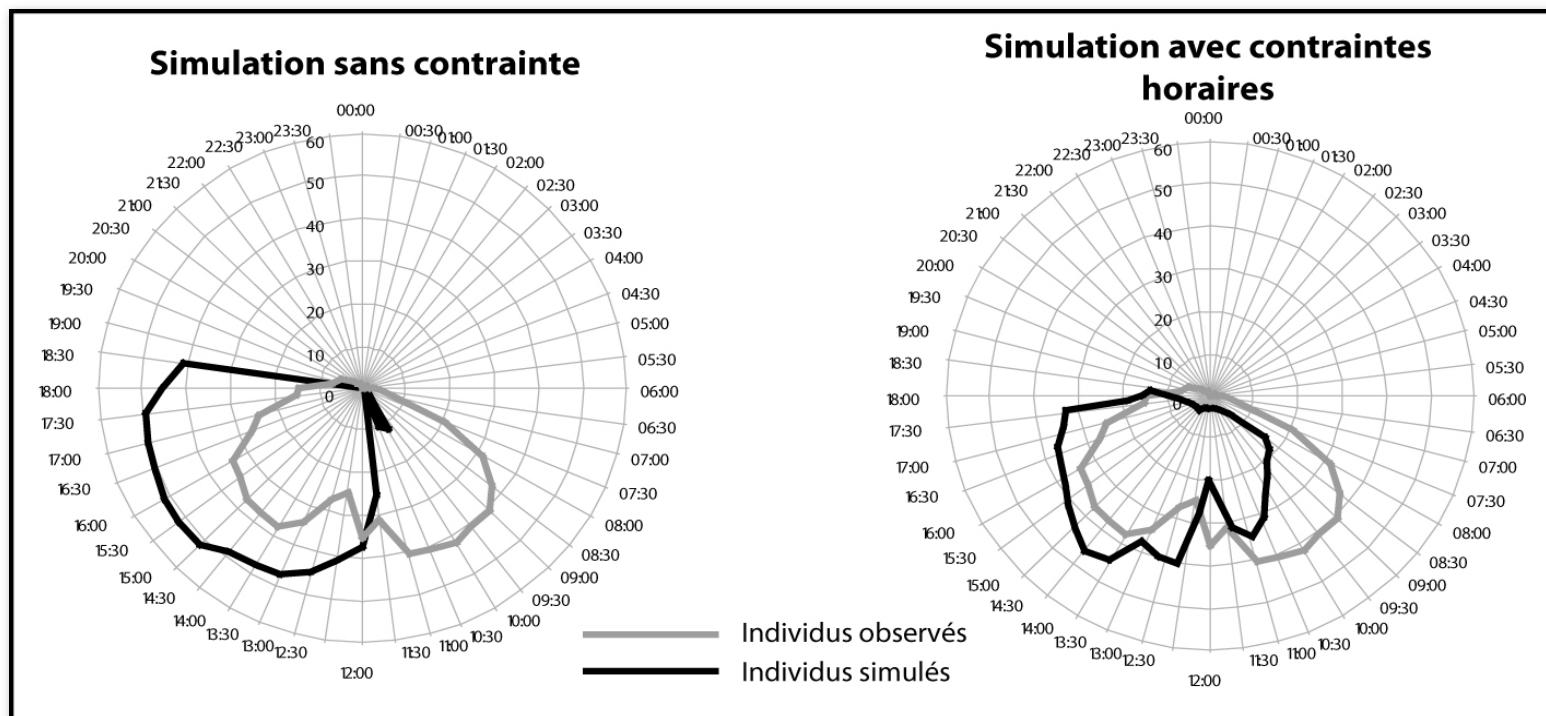


● Day 2





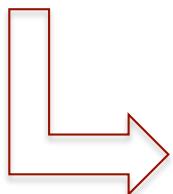
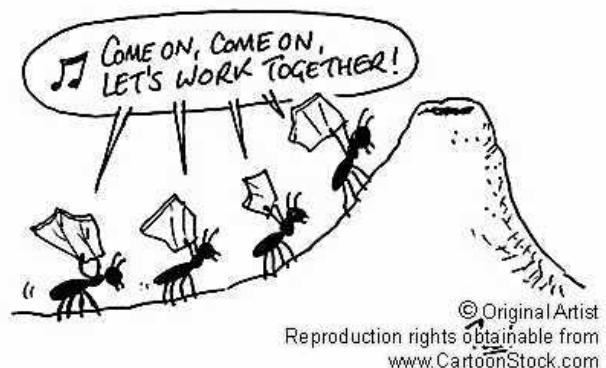
Importance des contraintes



Méditons...

- « Human beings, viewed as behaving systems, are quite simple. The apparent complexity of our behavior over time is largely a reflection of the complexity of the environment in which we find ourselves »
Herbert Simon

Comment agir sur les systèmes complexes ?



© Original Artist
Reproduction rights obtainable from
www.CartoonStock.com

by HAGEN



Méditons...

- « All models are wrong, but some are useful » (George Box)

Etes vous prêts ?

