



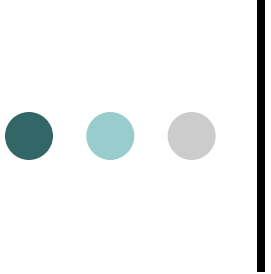
Modélisation et simulation de systèmes complexes

Marie Piron
IRD – UR013



Plan

- Systèmes complexes et modèles dynamiques
- Automates Cellulaires
- Systèmes Multi-Agents



Sciences sociales et systèmes complexes

- Analyse du changement et de l'évolution de phénomènes
 - Analyse de dysfonctionnement et de rupture d'équilibre
 - Émergence de dynamiques
- ➔ Recours à la modélisation dynamique pour rendre compte des nombreux processus sociaux, spatiaux, démographiques, économiques ou politiques qui interagissent à différentes échelles dans le temps et dans l'espace



Systeme et systemique

- Un **systeme** est un ensemble d'elements en interaction; les interactions contribuent à maintenir la structure du systeme et à la faire évoluer.
Le systeme est **dynamique** lorsque les interactions provoquent des changements d'etats

→ Etude des interactions sociales et spatiales :

identifier l'ensemble des processus par lesquels ce qui se passe pour un individu, une structure sociale ou en un lieu peut retentir sur l'évolution d'autres individus, d'autres structures ou d'autres lieux

→ Etude d'un phénomène dans la durée :

de quelle manière un phénomène se transforme-il, comment évolue-il, dans quelle mesure peut-il modifier son environnement et comment celui-ci peut rétroagir sur le phénomène ?



Modélisation dynamique

Modéliser c'est :

- Poser une (ou une série) d'hypothèses
- Donner un schéma des interactions entre les éléments
- L'exprimer par un formalisme mathématique et/ou informatique

○ **Démarche :**

- Identifier les entités, attributs, niveaux d'observations, niveau de décision, échelles temporelles et spatiales
- Construire le modèle (équations, lois de probabilités, règles d'apprentissage)
- Reproduire le système par simulation (à partir de données observées ou fictives)
- Valider le modèle et interpréter les résultats

○ **Outils de base :**

- Modèles
- Simulations



Outils : les modèles

○ Typologie de modèles

- Modèles de prévision (processus de Markov)
- Modèles de croissance (équations différentielles)
- Modèles spatiaux (approches gravitaires)
- Modèles du comportement individuel (statistique exploratoire, régression, ...)
- Modèles de décision (théories micro-économiques de l'utilité)
- Lois de probabilités
- Règles logiques, d'associations

→ La modélisation dynamique intègre plusieurs de ces modèles



Outils : la simulation

« Méthode consistant à créer un univers artificiel à partir de théories, de lois ou d'hypothèses et à observer le comportement de cet artefact sous quelques aspects lorsque le modèle est soumis à des variations, notamment temporelles » (T.Hagerstrand)

Appliquée à des systèmes sociaux, la simulation n'est pas directement prédictive, mais elle permet de mener des expériences, de tester des hypothèses et constitue un laboratoire sociologique

Chronologie des modèles dynamiques

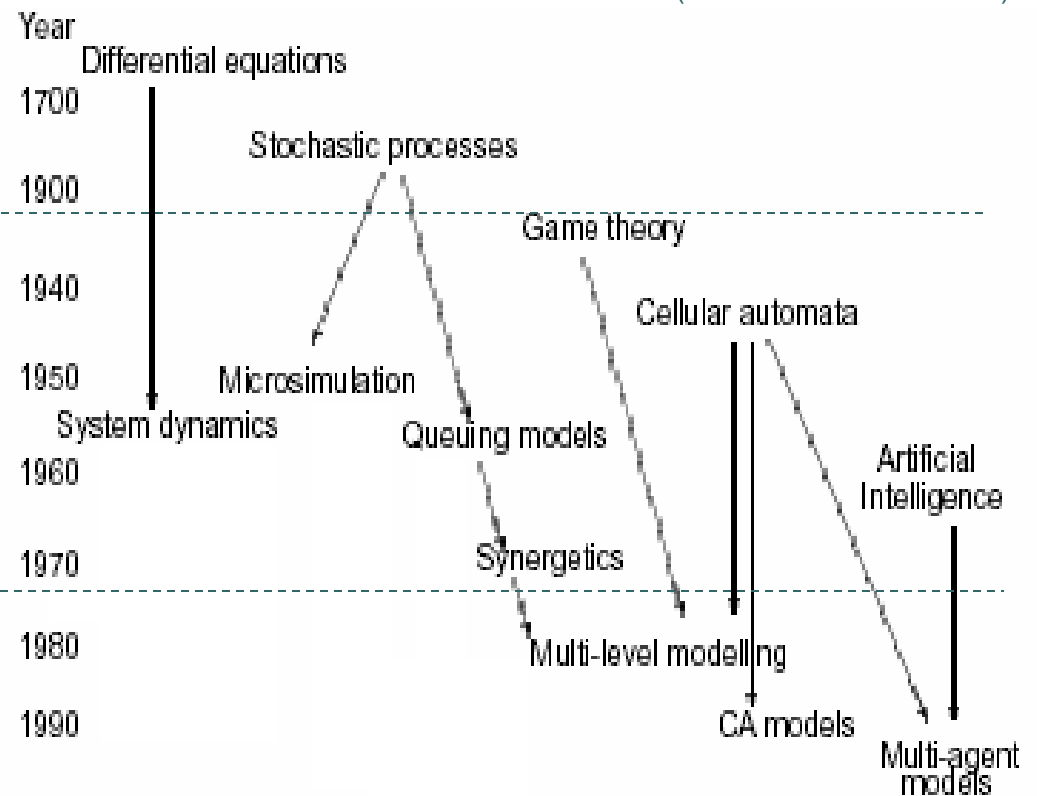
(source Troitzsch 1997)

- Mono-couche

- Multi-couches

- Micro \Rightarrow macro
(simulation)

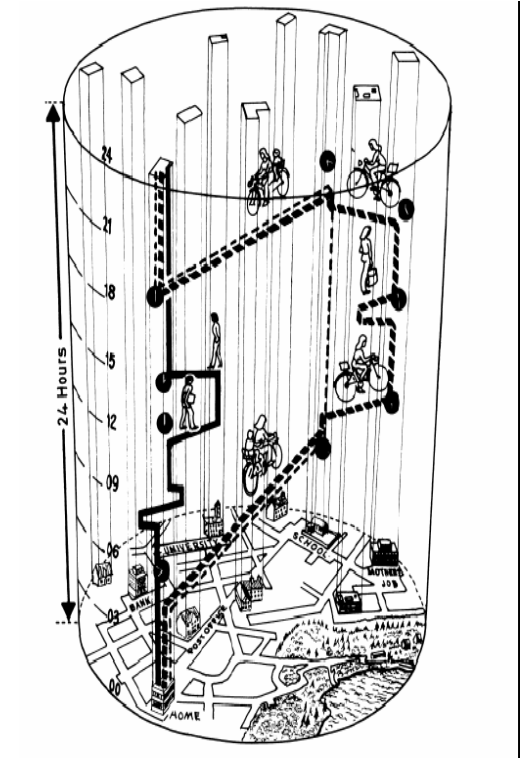
- Micro \Leftrightarrow macro
(système auto-organisé)



La microsimulation

« La microsimulation est une méthode qui permet d'observer la dynamique de systèmes socio-économiques à un niveau macro en prenant en compte les unités élémentaires qui composent ces systèmes et qui agissent à un niveau micro »

La time-geography est source d'inspiration de la microsimulation spatiale



l'idée de trajectoire spatio-temporelle selon Hägerstrand



Systemes auto-organisés

○ Interactions entre les niveaux micro-macro

- Le comportement collectif dépend des interactions individuelles
- Il y a incidence du micro (local) sur le macro (global) et réciproquement

○ Emergence

- Phénomène observable à un niveau global (macro) produit par les interactions entre les entités définies à des niveaux plus fins (micro) et persistant dans le temps et dans l'espace

→ L'auto-organisation est un ensemble de mécanismes (bifurcation, amplification, fluctuation) qui conduisent à l'apparition d'une propriété d'émergence au niveau global du système par le jeu des interactions entre les éléments des niveaux plus fins. Cette propriété ne peut pas être expliquées à partir des propriétés des éléments.

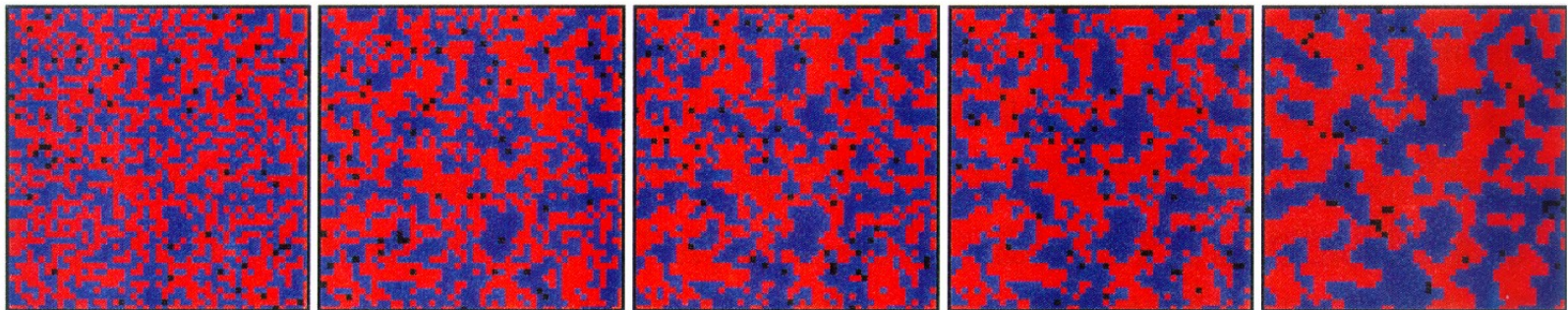
→ Automates Cellulaires et Systèmes Multi-agents sont conçus pour modéliser des systèmes spatialisés et pour rendre compte d'une auto-organisation

Systemes auto-organisés : exemple 1

Modèle de Schelling

Choix de localisation selon des critères souples :

- *Entités* : 2 groupes (rouge/bleu)
- *Règles* : 1/3 des voisins doivent appartenir au même groupe
- *Simulation* : État initial, répartition aléatoire
- *Résultats* : Emergence d'une structure ségrégative



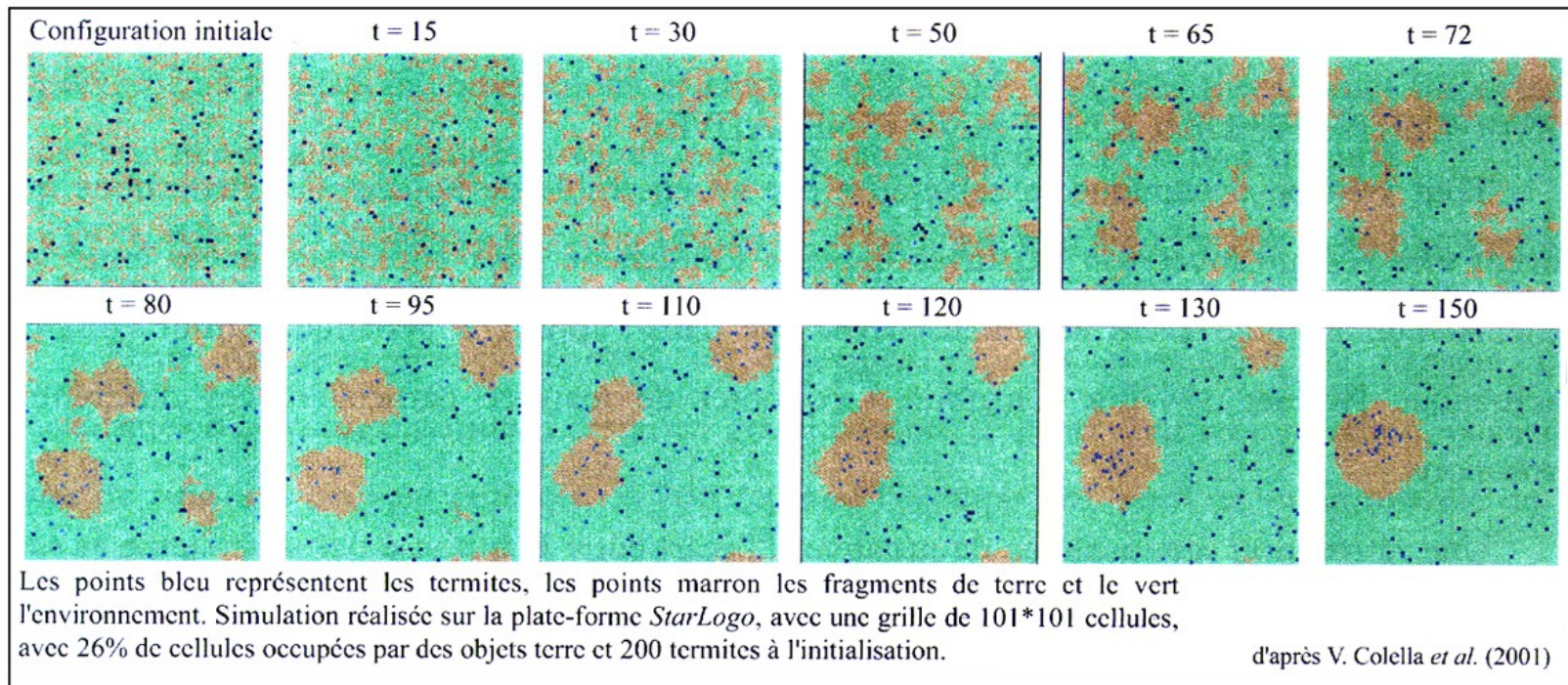
(Source Daudé, 2002)

Systemes auto-organisés : exemple 2

Simulation et émergence d'une forme
d'intelligence collective chez les termites



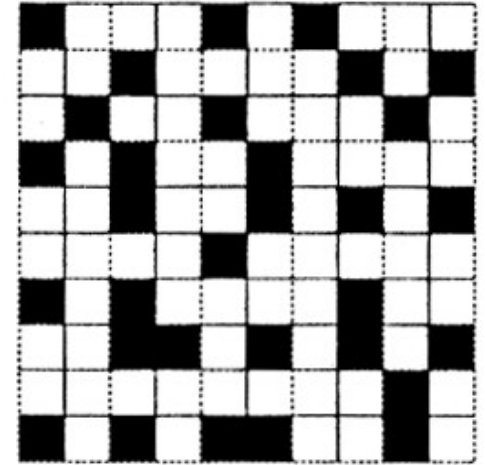
C:\Program
ar\Logo\Adventu



Automates cellulaires

○ Définition et principe

Un réseau d'automates cellulaires (AC) se présente comme « un système de cellules interagissant localement de manière simple et manifestant un comportement global complexe »; (Wolfram)

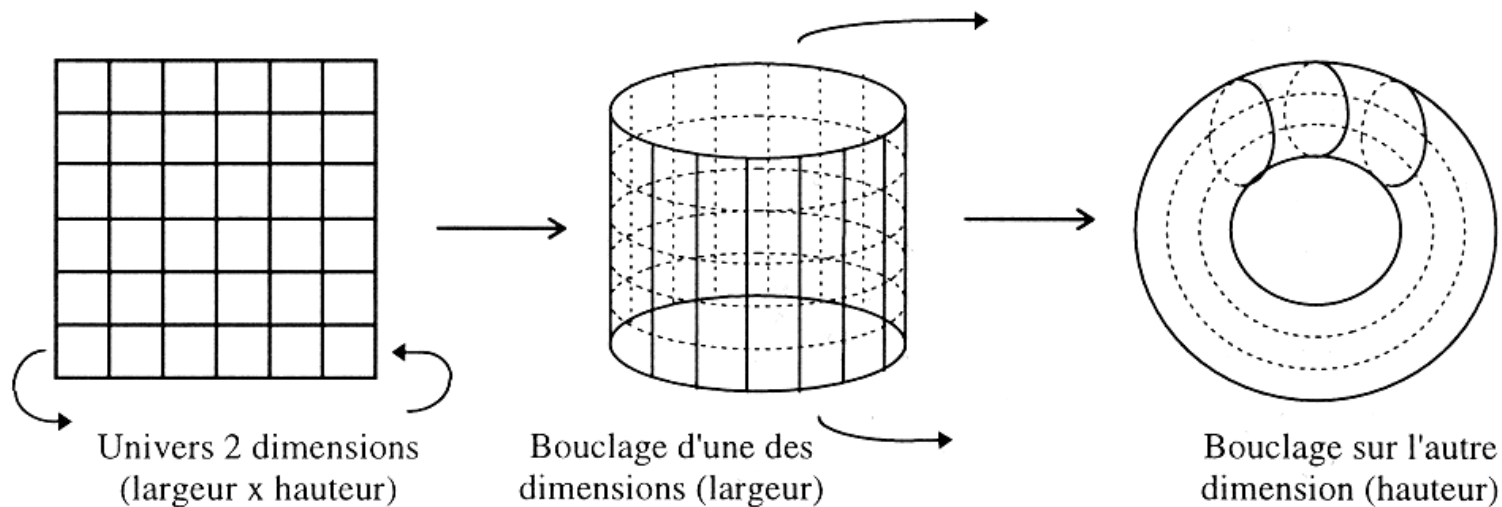


○ Composants d'un AC

Espace / voisinage / état / règles de transition / temps
où espace, temps et états sont discrets

Automates cellulaires

L'espace d'un automate cellulaire

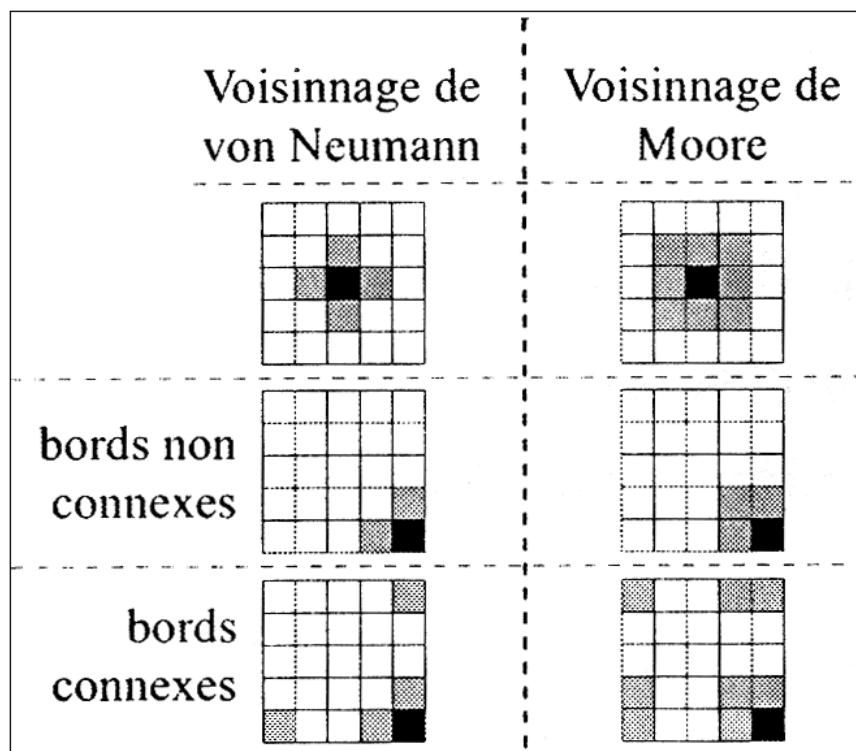


(Source Coquillard et Hill, 1997)

Automates cellulaires

Le voisinage d'un automate

Contiguïté d'ordre n :
4 ou 8 voisins

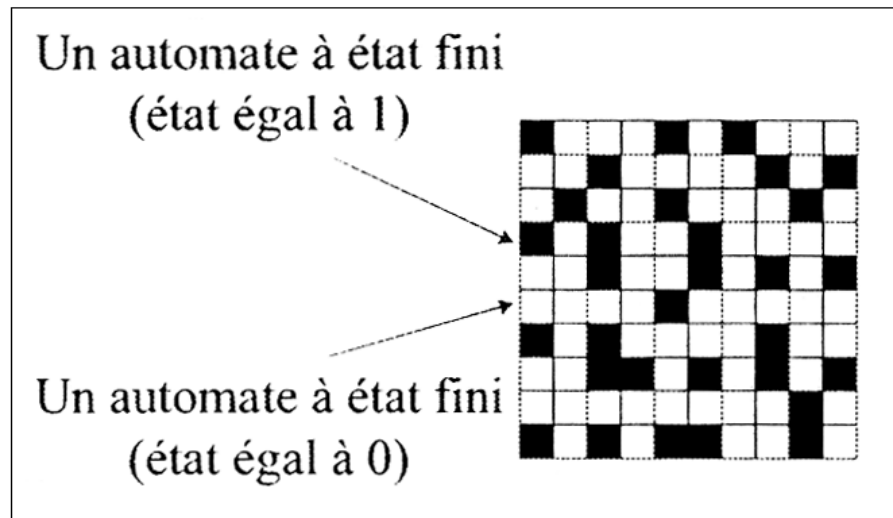


(Source Daudé, 2002)

Automates cellulaires

L'état d'un automate :

- Caractéristiques à modalités des cellules (occupations de sol, activités, traduites sous forme de présence/absence)
- Exemple jeu de la vie : deux états (vivant ou mort)



(Source Daudé, 2002)



Automates cellulaires

Les règles de transition :

- Règles qui spécifient l'état s que va prendre une cellule i à l'instant $t+1$ en fonction de son propre état et de celui de son voisinage V à l'instant t :

$$S_{(i,t+1)} = f(S_{(i,t)}, V_{(i,t)})$$

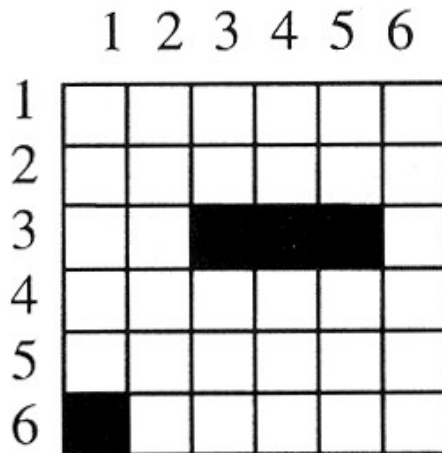
- Exemple : Jeu de la vie
 - *Naissance* : une cellule devient occupée, s'il y a plus de 3 cellules occupées autour d'elle;
 - *Mort* : une cellule devient inoccupée par isolement (moins de 2 cellules voisines occupées) ou par surpopulation (plus de 3 cellules voisines occupées);
 - *Survie* : une cellule reste occupée s'il y a 2 cellules occupées autour d'elle

Automates cellulaires

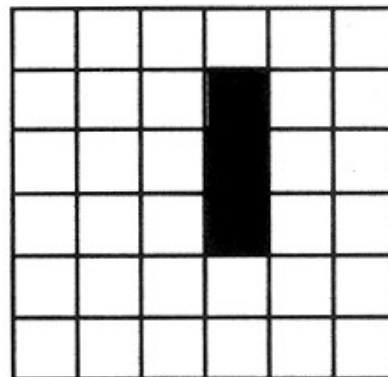
Exemple : Jeu de la vie

Si l'on examine pour chaque case la situation à l'instant t , les actions suivantes doivent s'exécuter simultanément (évolution parallèle)

- *Naissance* : une cellule devient occupée, s'il y a plus de 3 cellules occupées autour d'elle;
- *Mort* : une cellule devient inoccupée par isolement (moins de 2 cellules voisines occupées) ou par surpopulation (plus de 3 cellules voisines occupées);
- *Survie* : une cellule reste occupée s'il y a 2 cellules occupées autour d'elle



Etat instant t



Etat instant $t + 1$

- (2,4) et (4,4) deviennent occupées
- (3,4) se maintient
- (3,3), (3,5) et (6,1) deviennent inoccupées par isolement

(Source Daudé, 2002)



Exemple Automate Cellulaire : SpaCelle

P.Langlois – Labo MTG – UMR IDEES 6063 CNRS – Univ. Rouen

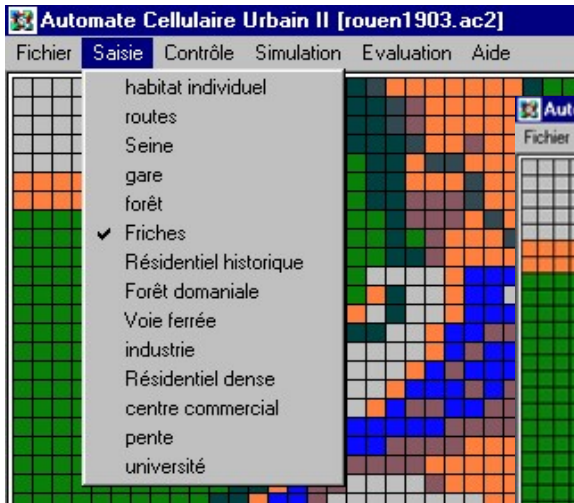
- SpaCelle : « Système de production d'Automate Cellulaire Environnemental »
 - Objectifs : Simulation de la croissance urbaine
 - Champ thématique d'application : Ville (Rouen)
 - Objets géographiques : Agrégats de population, Occupation du sol



Exemple Automate Cellulaire : SpaCelle

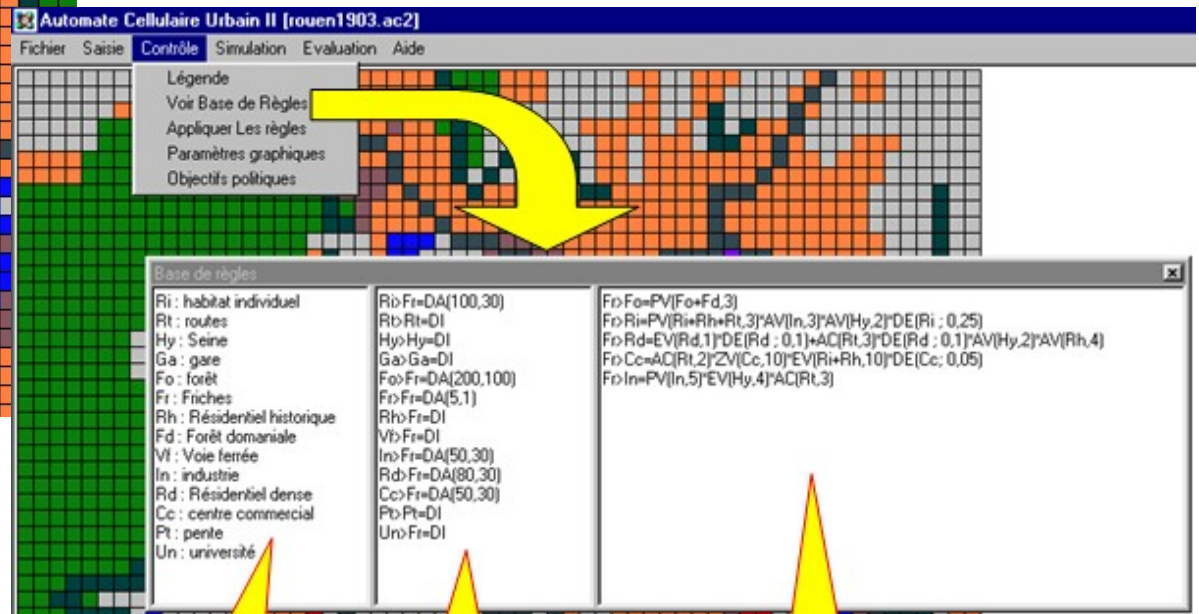
- Analyser l'évolution d'un espace urbain (Rouen) par un automate cellulaire sur la concurrence spatiale entre les formes d'occupation du sol
Etats : habitats, services, industrie, patrimoine, forêt, friche, ...)
- Tester les hypothèses émises sur l'évolution définies par les règles spatiales simples formulées à partir des connaissances empiriques
Règle : Une friche peut devenir une zone pavillonnaire s'il n'y a pas d'industrie à proximité ET s'il y a des commerces ou un centre-ville historique assez près (2km)

Exemple Automate Cellulaire : SpaCelle



Les Etats

La base des règles



**Zone de
définition des
états**

**Zone de
définition des
durées de vie**

**Zone des règles
de transition**

Exemple Automate Cellulaire : SpaCelle

The screenshot displays the 'Automate Cellulaire Urbain III [rouen1903 A.ac2]' window. The main area shows a grid-based simulation of an urban landscape with various land use types. The interface includes a menu bar (Fichier, Saisie, Contrôle, Simulation, Evaluation, Aide), a 'Base de règles' (Rules Base) window, and a 'Légende' (Legend) window.

Base de règles

Ri: habitat individuel	Ri>Fr=DA(100,30)	Fr>Fo=PV(Fo+Fd,1)*DE(Fo+Fd,0.3)
Rt: routes	Rt>Rt=Dl	Fd>Fo=PV(Fo+Fd,1)
Hy: Seine	Hy>Hy=Dl	Fd>Ri=PV(Ri+Rh+Rt,2)*ZV(In,3)*ZV(H,
Ga: gare	Ga>Ga=Dl	Fd>Rd=EV(Rd,1)*DE(Rd,0.1)+AC(Rt,
Fo: forêt	Fo>Fr=DA(200,100)	Fd>Cc=EV(Rt,1)*ZV(Cc,10)*PV(Ri+Rh,
Fr: Friches	Fd>Fr=DA(5,1)	Fd>In=EV(In,5)*EV(Hy,4)*EV(Rt,2)
Rh: Résidentiel historique	Rh>Fr=Dl	Fd>In=EV(Hy,4)*EV(Rt,2)*AL(1)
Fd: Forêt domaniale	Vb>Fr=Dl	
Vf: Voie ferrée	In>Fr=DA(50,30)	
In: industrie	Rd>Fr=DA(80,30)	
Rd: Résidentiel dense	Cc>Fr=DA(50,30)	
Cc: centre commercial	Pt>Pt=Dl	
Pt: pente	Un>Fr=Dl	
Un: université		

Légende

habitat individuel	Ri
routes	Rt
Seine	Hy
gare	Ga
forêt	Fo
Friches	Fr
Résidentiel historique	Rh
Forêt domaniale	Fd
Voie ferrée	Vf
industrie	In
Résidentiel dense	Rd
centre commercial	Cc
pente	Pt
université	Un



Conclusion : Automates Cellulaires

- **Avantages :**

Les automates cellulaires sont adaptés pour modéliser les phénomènes urbains tels que l'étalement et la forme urbaine, la ségrégation et la spécialisation urbaine, la simulation de l'urbanisation à une échelle régionale, la dynamique de l'utilisation du sol

- **Limites :**

- L'état d'un automate est conditionné par l'état de son voisinage;
- S'il y a incidence du local sur le global, l'inverse existe aussi mais les AC n'en rendent pas compte
- Mieux adaptés pour la modélisation des processus physiques (incendie, écoulement des eaux, ..) que pour des processus relevant de l'action humaine



Systemes multi-agents

un **Systeme Multi-Agent** met l'accent sur la modélisation d'entités, les *agents*, et sur les relations qu'ils entretiennent entre eux et avec leur environnement ; c'est un ensemble d'agents qui se déplacent dans un espace et qui sont capables de s'organiser pour accomplir collectivement leurs fonctionnalités



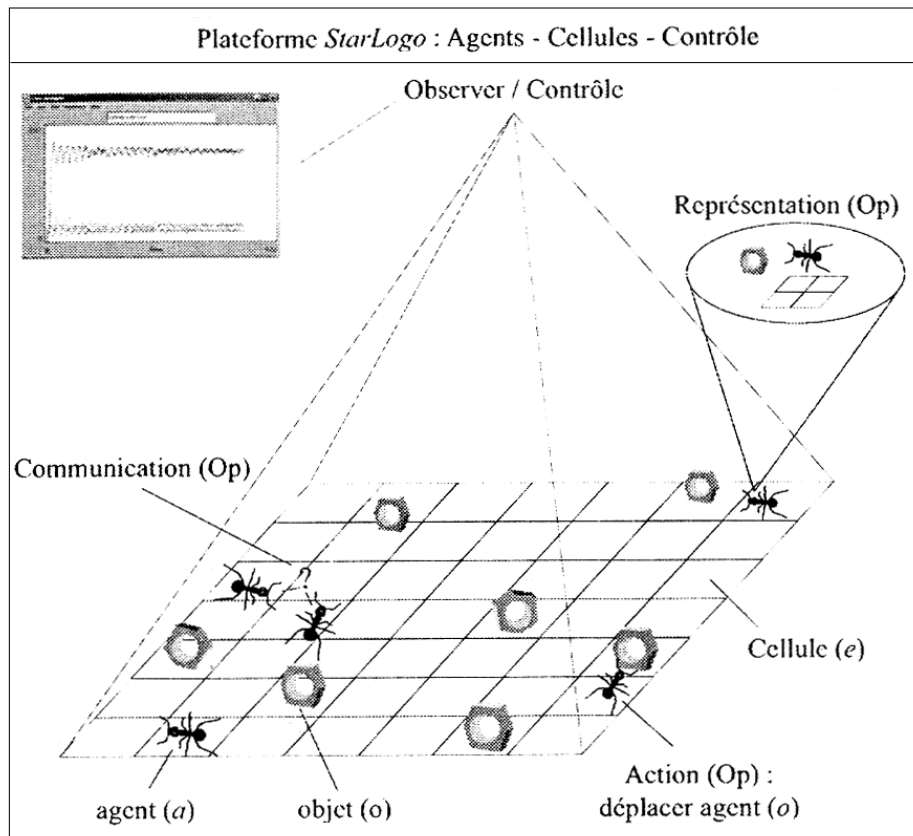
Systemes multi-agents

Définition (Ferber) :

- Un environnement E qui est un espace disposant d'une métrique
- Un ensemble d'objets qui sont localisés ; ces objets sont passifs, ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents
- Un ensemble d'agents, qui sont des objets particuliers et représentent les entités actives du système
- Un ensemble de relations qui unissent les objets
- Un ensemble d'opérations permettant aux agents de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler les objets

Systemes multi-agents

Univers multi-agents sur la plateforme starlogo



(Source Daudé, 2002)



Systemes multi-agents

Un agent peut être considéré comme un programme informatique.

Un agent est :

- *mobile* : il peut se déplacer dans l'espace.
- *réactif* : il agit de façon autonome et peut *percevoir* son environnement et répondre aux stimulus externes.
- *Proactif* : il prend l'initiative, il peut commencer l'interaction avec d'autres agents ou changer son environnement ;
- *petit* : en comparaison avec la taille du système, ses actions ne peuvent pas avoir des effets globaux sur l'environnement. Les changements globaux sont le résultat des actions accumulées de tous les agents.



Exemple de SMA : SimPop

Equipe P.A.R.I.S. – UMR Géographie-Cités – CNRS

- **SIMPOP** : Emergence et dynamique d'un système de villes
 - **Objectifs** : Simuler l'émergence et l'évolution d'un système de villes sur 2000 ans à travers le développement et la concentration de différentes fonctions urbaines
 - **Hypothèse** : les interactions entre entités spatiales jouent un rôle moteur dans la dynamique des territoires. Il s'agit d'identifier les entités spatiales élémentaires qui font sens (des individus qui partagent un même espace dont ils contribuent collectivement à définir l'identité et le fonctionnement) pour les représenter par un agent dans un système mult-agents.

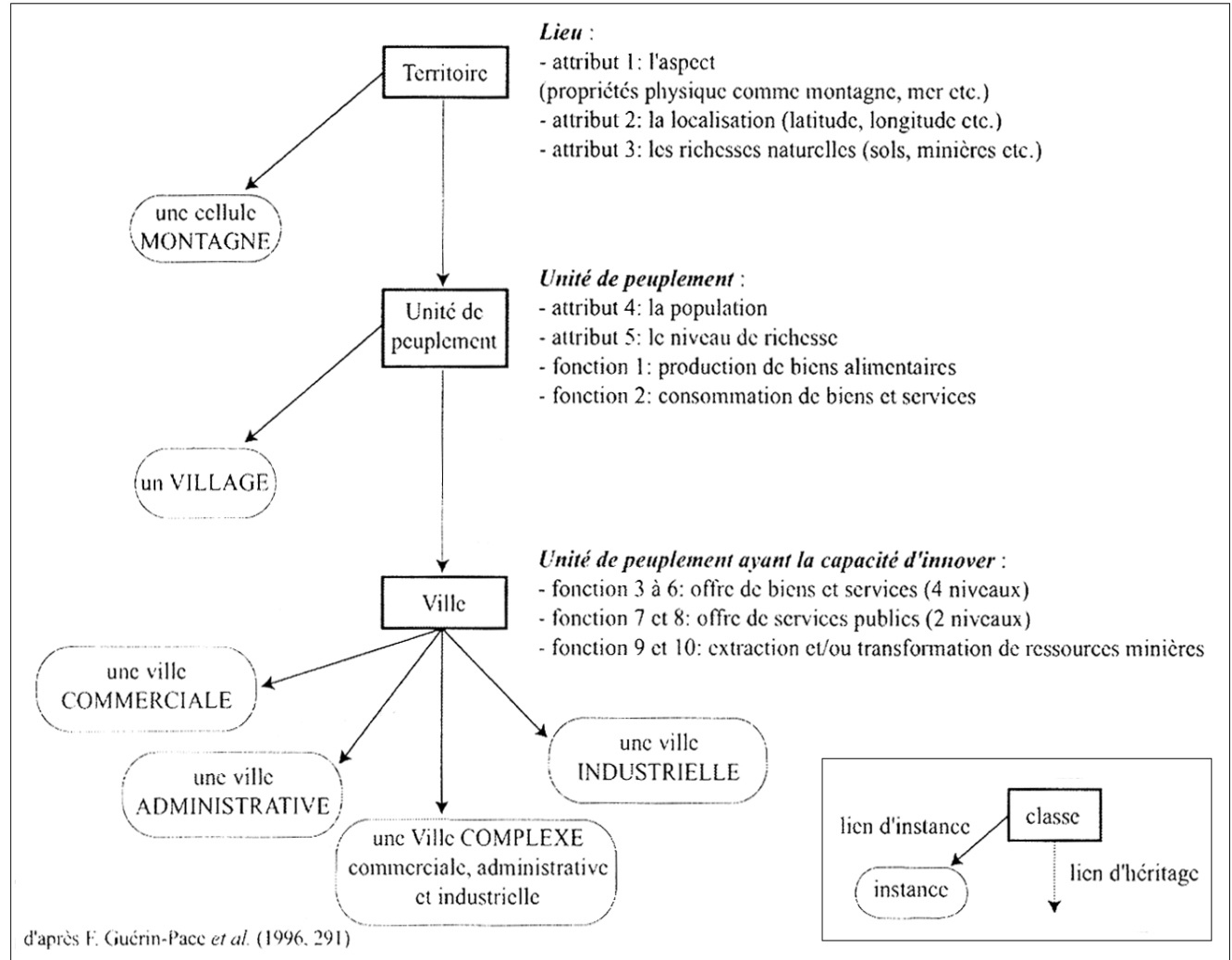


Exemple de SMA : SimPop

- **Territoire** : grille de 236 hexagones = unités géographiques ou unités potentielles de peuplement
- **Agents** : unités géographiques
- **Architecture** : Agents hiérarchisés
 - unités géographiques,
 - unités de peuplement (villages)
 - villes
- **Attributs** des agents:
 - unités géographiques : localisation, voisinage, ressources naturelles
 - unités de peuplement : idem + population
 - villes : idem + fonctions
- **Fonctions économiques, administratives** :
 - agricole et urbaine (commerciale, administrative, industrielle); moteur de la dynamique du système et permettent à l'agent de produire, s'enrichir et s'accroître

Exemple de SMA : SimPop

La hiérarchie des classes d'agents dans le modèle SimPop



Exemple de SMA : SimPop

Principales
caractéristiques
des fonctions
économiques

Type de fonctions	Portée spatiale	Production par actif	Demande par habitant	Prix	Impôt prélevé
<i>notation</i>	$p^{(1)}$	β	δ	π	
Agricole		$1,01+t*0,005^{(2)}$	1	$(d^{(3)}+1)/2$	10 % $R^{(4)}$
Commerciale 1	1	1,5	0,25	$(d+3)/4$	10 % R
Commerciale 2	2	2	0,125	$(d+3)/4$	10 % R
Commerciale 3	4	2,5	0,0625	$(d+3)/4$	10 % R
Commerciale 4	8	3	0,03125	$(d+3)/4$	10 % R
Administrative 1	3	0			30 % R
Administrative 2	6	0			0 ⁽⁵⁾
Industrielle	3	5			10 % R

⁽¹⁾ Les portées augmentent d'une unité tous les 250 ans, puis tous les 400 ans.

⁽²⁾ La production s'accroît au cours du temps, pour tenir compte des avancées technologiques.

⁽³⁾ d représente la distance entre le lieu de production et le lieu de demande.

⁽⁴⁾ R correspond à la richesse totale du lieu de peuplement.

⁽⁵⁾ Les villes administratives de niveau 2 ne sont pas taxées. En revanche, elles prélèvent sur tous les lieux à portée, de 10 % ou de 30 %, pour une ville administrative de niveau 1.

Exemple de SMA : SimPop

Exemples de critères d'obtention des différentes fonctions

Fonctions	Critères d'obtention
Agricole	Aucun
Commerciale 1	Population supérieure à 200 hab.
Commerciale 2	Posséder com 1 et $P > 250$ hab.
Commerciale 3	Posséder com 2 et $P > 400$ hab.
Commerciale 4	Posséder com 3 et $P > 750$ hab.
Administrative 1	Posséder au moins com2, $P > 500$ hab. et $R > 500^{(1)}$
Administrative 2	Posséder adm 1 et $P > 1000$ hab. et $R > 1000^{(1)}$
Industrielle 1	Posséder des ressources industrielles $K > 0$
Industrielle 2	Richesse $(t) /$ Richesse totale $> k(t)^{(2)}$

Notation : P désigne la population, R , la richesse et K les ressources industrielles.

⁽¹⁾ A condition que sa zone d'influence n'empiète pas sur celle d'une ville administrative déjà existante.

⁽²⁾ $k(t)$ est un paramètre évoluant dans le temps : $k(t) = 0,1 - (an - 1800) / .1000$.

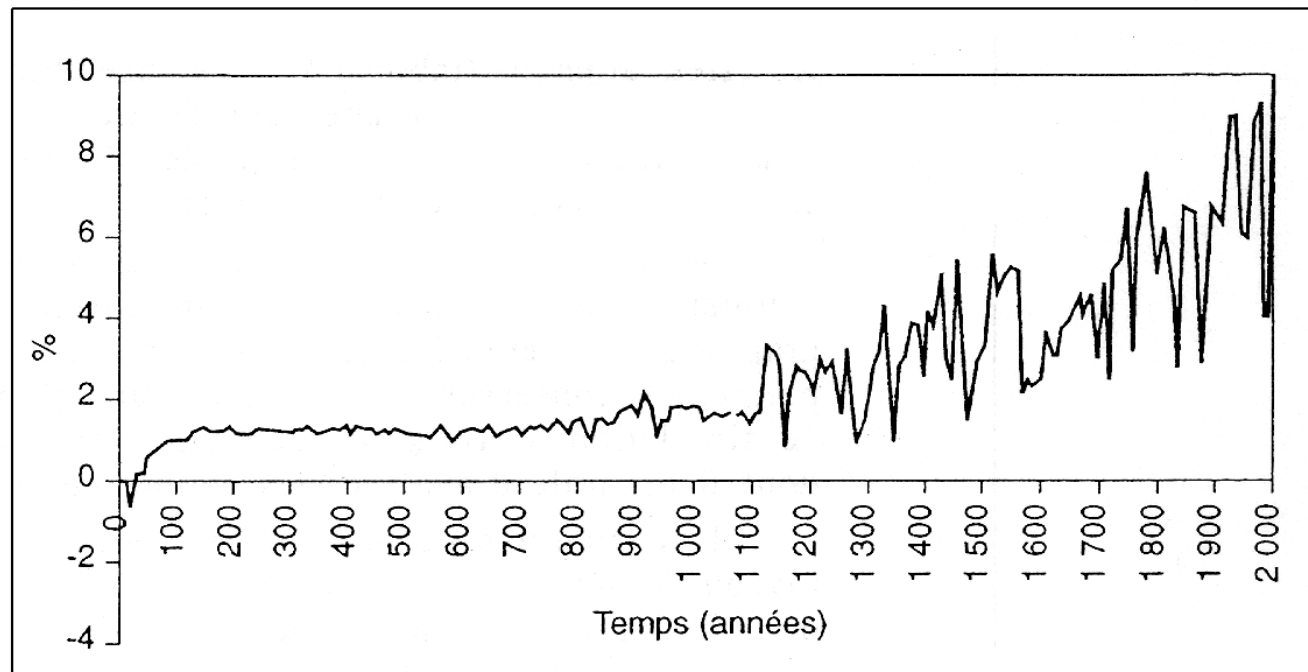
Exemple de SMA : SimPop

T=1000



Exemple de SMA : SimPop

exemple d'un résultat :
croissance moyenne de la population (% par tranche de 10 ans)





Exemple de SMA : SimPop

En simulant une évolution sur 2000 ans, le modèle réussit à reproduire une transformation historique, la transition urbaine, c'est-à-dire le passage d'un peuplement rural, homogène et dispersé, à un peuplement urbain, concentré et hiérarchisé.



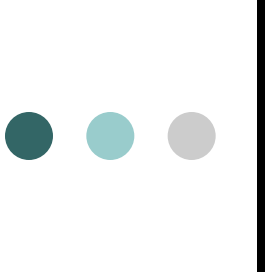
Systemes multi-agents : conclusion

- Autres exemples : déplacements de populations
 - Modélisation Intra-urbaine des Rythmes quOtidienS (MIRO): LIFC – THEMA (Univ Franche comté)
 - Modélisation des mobilités résidentielles de BOGOTA : (IRD-LIP6)
- Apprentissage et analyse exploratoire, confirmatoire pour :
 - Définir les agents et niveau de modélisation
 - Définir les règles
 - Analyser les résultats de simulations
- Modèles hybrides :
 - Automates cellulaires + modèle mathématique + lois de probabilité
 - Systemes multi-agents + automates cellulaires + règles logiques



Conclusion

- **Explorer la complexité des structures et des dynamiques spatiales** (croissance et formes urbaines : White et Engelen 1993; Portugali, 2000) (formes fractales : Batty et Longley 1994; Frankhauser 1994)
- **Produire des modèles abstraits** pour tester des hypothèses et des théories géographiques (Simpop; Guerin et al 1997)
- **Reproduire des phénomènes réels**



Principales références bibliographiques utilisées

- Coquillard P. et Hill D., 1997, *Modélisation et simulation d'écosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à évènements discrets*, Masson
- Daudé E., 2002, *Modélisation de la diffusion d'innovations par la simulation multi-agents. L'exemple d'une innovation en milieu rural*, thèse univ. Avignon.
- Guermond Y. (éd.), 2005, *Modélisations en géographie*, Paris Hermes, 389p
- Pavé A., 1994, *Modélisation en biologie et en écologie*, Aléas
- Pumain D., Sanders L., St-Julien Th., 1989, *Villes et auto-organisation*, economica
- Sanders L. (éd.), 2001, *Modèles en analyse spatiale*, Paris, Hermes, 333p.
- Sanders, 1994, *système de villes et synergétique*, Anthropos
- Inventaires des modèles
 - <http://www.mgm.fr/libergeo/modele.php>
 - <http://www.cerma.archi.fr/inventur/000.html>