

# Villes émergentes, villes mutantes

la théorie des systèmes complexes et de  
l'évolution appliquée à la modélisation urbaine

Olivier Scheffer

2011

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

## **DROITS D'AUTEUR**

Conformément à la loi du 11 mars 1957 et la loi du 3 juillet 1985, codifiées dans le code de la propriété intellectuelle, ce document peut être cité et des extraits repris, à condition de citer le titre du document et son auteur sous la forme suivante :

Olivier Scheffer - Villes émergentes, villes mutantes : la théorie des systèmes complexes et de l'évolution appliquée à la modélisation urbaine, mémoire du Mastère Spécialisé Création et Technologie Contemporaine, ENSCI – Les Ateliers, Mai 2011 – <http://tinyurl.com/villes-emergentes>

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

## **SOMMAIRE**

<b>Introduction : penser la ville autrement .....</b>	<b>4</b>
<b>I. Hyper-peri-urbanisation globale : la marée grise .....</b>	<b>6</b>
<i>Un phénomène mondial en croissance exponentielle.....</i>	<i>6</i>
La croissance de la population urbaine .....	6
L'apparition des mégapoles, mégalopoles et archipels mégapolitains mondiaux .....	6
La croissance des bidonvilles .....	7
La périurbanisation et l'étalement urbain .....	8
<i>Les explications classiques de l'urbanisation et de l'étalement urbain.....</i>	<i>9</i>
L'urbanisation sous l'angle historique .....	9
L'urbanisation sous l'angle économique .....	10
L'urbanisation sous l'angle de la créativité.....	13
Trouver un cadre conceptuel approprié à la complexité urbaine .....	15
<b>II. Systèmes complexes et émergence, un nouveau paradigme pour comprendre la ville .....</b>	<b>16</b>
<i>La théorie des systèmes complexes et de l'émergence.....</i>	<i>16</i>
La « complexité organisée » .....	16
La symbiogénèse, ou comment un organisme complexe pouvait résulter de la symbiose d'organismes simples ....	16
La morphogénèse, ou l'émergence de la forme par les processus.....	16
L'intelligence collective, ou comment une intelligence peut émerger d'interactions physico-chimiques.....	17
Auto-organisation de systèmes complexes et émergence .....	18
<i>La ville comme évolution et émergence de systèmes sociaux complexes.....</i>	<i>18</i>
Le trottoir, média des citoyens .....	18
Lois d'attraction/répulsion et boucles de rétroaction locales, moteurs des quartiers .....	19
La ville, système de management de l'information et de l'innovation .....	19
La ville, superorganisme autopoïétique.....	20
La ville assemblage, symbiose dynamique instable de relations d'extériorité territorialisantes .....	21
Le code génétique des villes révélé .....	24
<b>III. La modélisation évolutionniste de la complexité urbaine .....</b>	<b>26</b>
<i>Les algorithmes évolutionnistes, ou comment un élevage de mini-programmes informatiques peut battre un méga-programme classique.....</i>	<i>26</i>
De la logique descendante unifiée à la logique ascendante distribuée, le changement de paradigme d'Oliver Selfridge .....	26
L'émergence de formes auto-organisées et d'une intelligence des essaims .....	26
La sélection naturelle appliquée à l'informatique .....	29
<i>Modéliser la ville complexe.....</i>	<i>31</i>
Les fondements du design paramétrique et de la syntaxe spatiale .....	31
Les apports des systèmes multi-agents, des algorithmes génératifs et génétiques .....	34
<i>Exemples d'applications à l'urbanisme.....</i>	<i>39</i>
Plan d'urbanisme de Kartal-Pendik, par Zaha Hadid Architects (2006) .....	39
Quartier Urban Reef, Hudson's Yard, NYC, par Shampoo (2009) .....	41
Swarm City et Information Urbanism, par Ming Tang et Jonathon Anderson (2010) .....	43
KNFRK, East London, par Intravein (2008) .....	44
<i>Enjeux actuels et potentiels futurs.....</i>	<i>45</i>
Une prise en compte plus avancée de la complexité des systèmes sociaux .....	45
Le traitement de quantités phénoménales de données hétérogènes .....	45
Une évolution indispensable des techniques et technologies de construction .....	45
Une approche plus transversale et collaborative des projets .....	47
Un changement profond du rôle du maître d'œuvre .....	47
Vers un urbanisme paramétrique participatif ?.....	48
<b>Conclusion .....</b>	<b>49</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>50</b>
<b>Biographie de l'auteur .....</b>	<b>57</b>
<b>Références.....</b>	<b>58</b>

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

## **INTRODUCTION : PENSER LA VILLE AUTREMENT**

2007 a marqué un tournant dans l'histoire de l'humanité : après n'avoir été que 3% des habitants de la planète en 1800, les citadins dépassaient la barre des 50%. Ils sont déjà 79% dans un pays qui se croit encore agricole comme la France, et atteindront 70% au niveau global dès 2050, faisant entrer définitivement notre civilisation dans l'ère de *l'homo-urbanus*<sup>a</sup>.

D'un point de vue économique, social et culturel, nous pourrions nous réjouir d'une telle tendance, puisque comme l'affirme le rapport de l'ONU de mars 2010 « État des villes dans le monde 2010-2011 : réduire la fracture urbaine » : « le niveau d'urbanisation est associé en certains endroits à de nombreux résultats positifs, comme l'innovation technologique, diverses formes de créativité, le progrès économique, des niveaux de vie plus élevés, un renforcement de la responsabilisation démocratique et l'autonomisation des femmes. »

Pourtant, à l'échelle de notre biosphère, le développement de notre civilisation urbaine est loin d'être harmonieux, remettant même potentiellement en jeu sa propre existence.<sup>1</sup>

En effet, notre modèle d'urbanisation, qui est le reflet de notre société industrielle de consommation, exploite 75% des ressources naturelles de notre planète et est à l'origine de 75% des émissions de gaz à effets de serre<sup>b</sup>. La seule consommation de matières premières par nos villes est telle, que les réserves s'épuisent, que ce soit le pétrole (45 ans), les métaux (20 ans pour le zinc, 33 pour le cuivre,..), ou encore les forêts (au rythme de 13 millions d'hectares par an, soit plus que la superficie de la Grèce).

Nos bâtiments consomment à eux seuls 40% de l'énergie globale (dont l'énergie grise des matériaux<sup>c</sup>), 12% de l'eau potable pour leur fonctionnement, et 19% de la production d'électricité pour leur éclairage. Ils sont par ailleurs responsables de 40% des émissions de gaz à effet de serre et de 40% des déchets.

Les surfaces des villes augmentent deux fois plus vite que leur population, entraînant un recul des terres agricoles et des forêts au détriment de la biodiversité, et une augmentation des transports et de la pollution, en particulier l'émission de gaz carbonique. Si l'on ne s'en tient qu'à la France, l'équivalent de 164 terrains de football sont artificialisés chaque jour, principalement aux alentours des grandes villes, le long des infrastructures de transport et près du littoral. Cette artificialisation globale de la planète entraîne une imperméabilisation des sols et un dérèglement du cycle de l'eau, une diminution des capacités d'absorption du CO<sub>2</sub>, une augmentation des tâches de chaleur et un dérèglement du climat urbain, et une fragmentation des habitats naturels, première cause de l'atteinte à la biodiversité devant la pollution.

Même pour ses propres habitants, et malgré un tel coût global pour la planète, la ville ne semble pas apporter que des bienfaits : saturation des transports, en raison d'une dépendance quasi-totale à l'automobile et d'un mode de vie périurbain qui se généralise, pollution de l'air, entraînant des maladies respiratoires chez 20 millions d'européens, pollution sonore, dépassant le seuil critique pour la santé de 70dB pour 67 millions d'européens, pollution visuelle, avec le développement anarchique des entrées de ville et leurs zones commerciales, affichages publicitaires, zones pavillonnaires ou cités standardisées, réseaux routiers tentaculaires, lignes à haute tension... Un environnement agressif qui serait même néfaste pour notre santé mentale et physique : perte des facultés de concentration et d'apprentissage, augmentation du niveau d'agressivité - jusqu'à modifier la façon même dont nous pensons, la ville subvertissant notre capacité à résister à la tentation consumériste, d'après certains spécialistes<sup>d</sup>.

Mais l'impact le plus préoccupant est certainement le réchauffement climatique, considéré maintenant comme inéluctable à commencer par le secrétaire général des Nations unies lui-même, et entraînant d'ici 2080, selon les experts du GIEC, l'exposition de centaines de millions de personnes à un stress hydrique accru, l'extinction majeure de 70% des espèces, des millions de personnes victimes d'inondations côtières, de vagues de chaleur et la migration de vecteurs pathogènes, jusqu'à envisager que « si l'évolution du climat se poursuivait sans intervention, la capacité d'adaptation des systèmes naturels, aménagés et humains, serait dépassée à longue échéance » – en d'autres termes, la fin de l'espèce humaine.<sup>2</sup>

---

<sup>a</sup> L'appellation est de Jeremy Rifkin (1945), économiste américain, président de la Foundation On Economic Trends

<sup>b</sup> si, au-delà des seuls bâtiments, responsables à eux seuls de 40 à 50% des GES, on inclut la production d'énergie nécessaire à la construction et au fonctionnement des villes, que ce soit pour les bâtiments, les transports, les biens industriels, et le traitement des déchets

<sup>c</sup> L'énergie grise correspond à la somme de toutes les énergies nécessaires à la conception, production (extraction, transport, transformation des matières premières), à la fabrication et commercialisation, à l'utilisation et à l'entretien, et enfin au recyclage des matériaux ou des produits.

<sup>d</sup> d'après des recherches récentes au Laboratoire de neuroscience cognitive à l'Université du Michigan, au Laboratoire du paysage et de la santé humaine à l'Université d'Illinois

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

Pourquoi dès lors les villes continuent-elles de croître et de s'étaler inéluctablement, à un rythme de plus en plus soutenu ? Pourquoi est-ce que les gouvernements, les maires et les urbanistes s'avèrent-ils si impuissants face à leur extension et leur impact ? Pourquoi est-ce que les initiatives d'éco-construction, éco-quartiers, éco-cités ne se développent-elles que si marginalement par rapport à l'extension supersonique des banlieues occidentales et villes industrielles chinoises ?<sup>3</sup> Y a-t-il des règles qui régissent la vie des villes – ou leur mort – ou bien sont-elles un phénomène purement anarchique, un chaos inextricable qui nous mènerait au chaos nous-mêmes ?

“Nous ne pourrions pas faire que nos villes fonctionnent mieux si nous ne savons pas comment elles fonctionnent”. L'affirmation de Geoffrey West, ex-Président du Santa Fe Institute, centre de réputation mondiale pour l'étude des systèmes complexes, est une évidence, mais sa résolution semble être hors de portée de notre entendement.

Pourtant, des progrès scientifiques majeurs au XXe siècle dans, justement, le domaine des systèmes complexes apportent aujourd'hui des premières pistes de réponses. Issue de travaux fondateurs dans les années 50 du biologiste austro-américain Ludwig von Bertalanffy, qui fonda la théorie générale des systèmes<sup>e</sup>, ainsi que du mathématicien américain Norbert Wiener, fondateur lui de la cybernétique, la théorie des systèmes complexes tente de comprendre le comportement apparemment imprévisible de phénomènes que l'approche réductionniste et mécaniste cartésienne ne parvient pas à élucider, tels que la fluctuation des cotations à la bourse, le comportement d'essaims d'abeilles ou de colonies de fourmis, le fonctionnement d'un écosystème écologique...ou d'une organisation humaine.

La théorie des systèmes complexes est fondamentalement transdisciplinaire, puisant ses sources et s'appliquant dans des domaines aussi variés que la physique, la chimie, la biologie, les mathématiques, l'informatique, la sociologie, la géographie, la politique, la psychothérapie, l'économie, la philosophie, ou encore plus récemment, l'urbanisme.

Notre propos ici est de montrer comment la théorie des systèmes complexes a permis d'apporter un premier cadre explicatif au fonctionnement de nos villes, et comment, en parallèle, elle a donné naissance à un domaine d'application radicalement nouveau en informatique, le calcul paramétrique et évolutionniste, qui semble aujourd'hui permettre de modéliser la complexité urbaine, et notamment de concevoir la ville de manière totalement nouvelle.

Nous donnerons ensuite des exemples d'applications de ces nouvelles techniques d' « urbanisme paramétrique », puis en montrerons les limites actuelles et les potentiels futurs.

Restera encore à voir si ces nouveaux cadres conceptuels, méthodologies et outils pourront apporter une réponse à l'enjeu de la ville durable, résiliente et adaptative.

---

<sup>e</sup> *general systems theory – GST / systémique*

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

## I. HYPER-PERI-URBANISATION GLOBALE : LA MAREE GRISE<sup>f</sup>

### UN PHENOMENE MONDIAL EN CROISSANCE EXPONENTIELLE

#### LA CROISSANCE DE LA POPULATION URBAINE

En 2007, pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, la population urbaine a dépassé en nombre la population des campagnes.

En 1800, 3% de la population mondiale vivait en ville, contre 15% en 1900, et 30% en 1950. Entre 1900 et 2000, la population urbaine a été multipliée par 20 alors que la population mondiale se contentait de quadrupler.

En 2050 les citadins seront 70%, et plus de 80% dans de nombreux pays, comme déjà aujourd'hui au Brésil (86%), en Corée (82%), aux Etats-Unis (81,5%) ou en France (84%) - pays qui malgré sa très forte culture agricole deviendra en 2050 le pays le plus urbain de la planète.

Le phénomène sera massif dans les pays en développement qui devraient compter 4 milliards d'urbains en 2030, soit 80% des citadins.

D'ici 2050, le processus d'urbanisation totale de notre planète sera quasiment achevé.

#### L'APPARITION DES MEGAPOLES, MEGALOPLES ET ARCHIPELS MEGALOPOLITAINS MONDIAUX

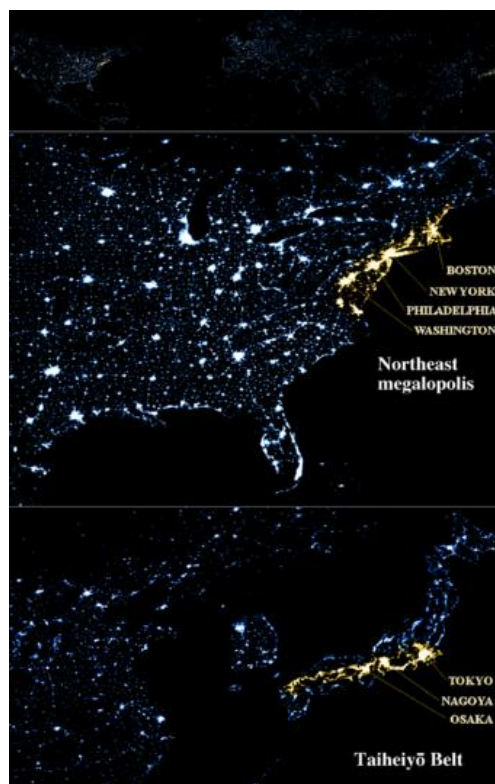
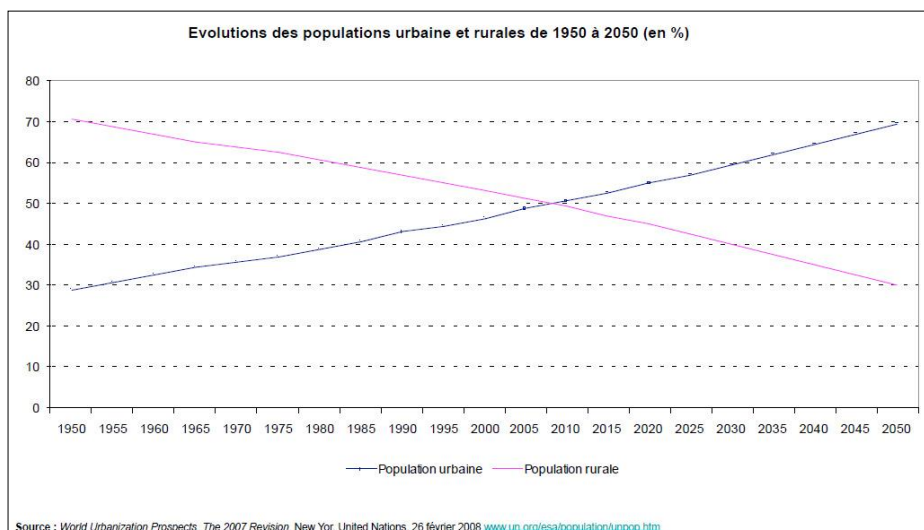
29 mégapoles<sup>g</sup> devraient atteindre plus de 10 millions d'habitants en 2025, dont 9 plus de 20 millions. 22 mégapoles sur 29 sont dans des pays en développement, dont 7 de plus de 20 millions : Delhi (28,57), Mumbai/Bombay (25,81), São Paulo (21,65), Dhaka (20,94), Mexico (20,71), Calcutta (20,11) et Shanghai (20,02).

Tokyo, avec 37,09 millions d'habitants prévus en 2025, reste néanmoins la plus grande ville de la planète - sa population dépassant celle de l'Algérie ou du Canada aujourd'hui.

L'agglomération parisienne quant à elle devrait atteindre 10,88 millions d'habitants en 2025, devançant largement Londres qui sort du classement des 30 plus grandes villes de la planète à cet horizon.

La croissance se concentre néanmoins dans les villes de moins de 100.000 habitants (+450 millions entre 2009 et 2025) et dans les villes de population comprise entre 1 et 5 millions d'habitants (+260 millions)<sup>4</sup>.

Ces villes tendent à former avec les mégapoles un tissu urbain ininterrompu, étroitement connecté par des réseaux de transports, à



Photos satellite de la NASA, 2008. Source : [http://visibleearth.nasa.gov/view\\_detail.php?id=1438](http://visibleearth.nasa.gov/view_detail.php?id=1438)

<sup>f</sup> Pour une étude complète de l'impact de l'urbanisation, voir Olivier Scheffer, *Hyper-urbanisation : la marée grise*, éditions Symbiopolis, novembre 2010

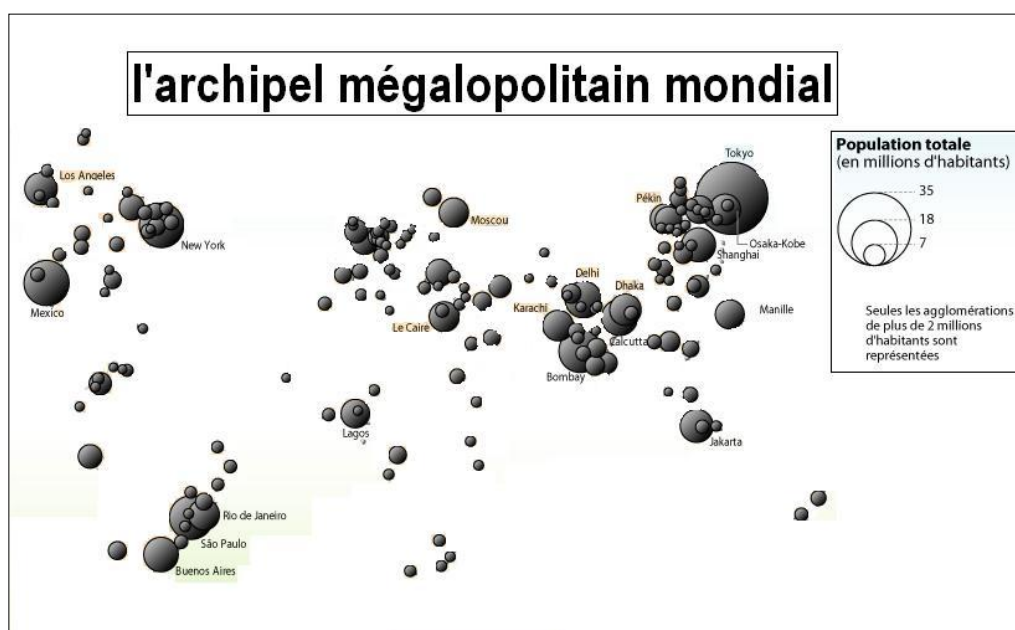
<sup>g</sup> L'ONU définit une ville comme une unité urbaine de plus de 20.000 habitants, ce seuil variant grandement de pays à pays (2.000 habitants en France et en Allemagne, 200 au Danemark, 10.000 en Espagne ou en Suisse et 50.000 au Japon), et une mégapole comme une agglomération de plus de 10 millions d'habitants (anciennement 8).

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

l'instar du BosWash Corridor<sup>h</sup> s'étendant sur 800km sur la côte nord-est des Etats-Unis entre Boston et Washington, D.C., et comprenant 44 millions d'habitants, soit 16% de la population américaine, ou encore de la Taiheiyō Belt nipponne qui s'étend sur plus de 1200 km de Tokyo à Fukuoka, et rassemble 105 millions d'habitants, soit environ 80% de la population japonaise sur 6% du territoire.

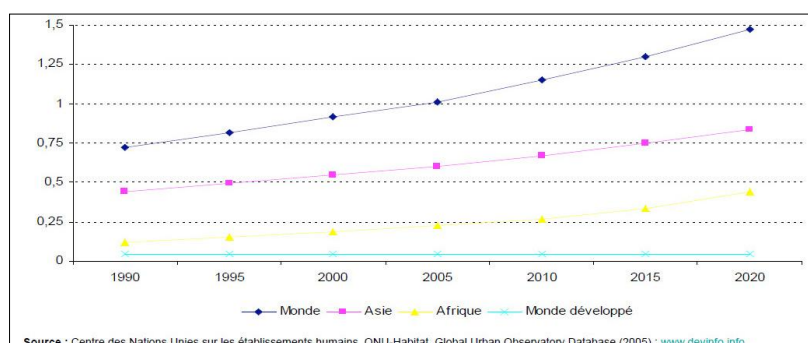
Au-delà de leur étroite interconnexion, l'urbanité de ces mégalopoles se définit également par la concentration des pouvoirs politiques, économiques et médiatiques, ainsi que d'une forte capacité d'innovation (centres de recherche et universités). Fernand Braudel<sup>5</sup>, historien français (1902 – 1985), introduit en 1979 le concept de « villes monde » pour décrire ces villes exerçant des fonctions stratégiques à l'échelle mondiale.

Olivier Dollfus, géographe français (1931 – 2005), spécialiste de la mondialisation, reprend le concept de « villes monde » de Braudel mais y ajoute celui d'archipel mégapolitain mondial (AMM): un système urbain global constitué de « villes monde ». Il précise : l'archipel mégapolitain mondial est un « ensemble de villes qui contribuent à la direction du monde, [...] et l'un des symboles les plus forts de la globalisation liée à la concentration des activités d'innovation et de commandement. [...] Les mégalopoles ont d'excellentes liaisons avec les autres « îles » de l'archipel mégapolitain mondial (ce qui donne tout son sens au terme d'archipel) et concentrent entre elles l'essentiel du trafic aérien et des flux de télécommunication [...]. 90 % des opérations financières s'y décident et 80 % des connaissances scientifiques s'y élaborent [...] »<sup>6</sup>



## LA CROISSANCE DES BIDONVILLES

Mais cette urbanisation globale cache des réalités extrêmement contrastées. On assiste en effet à la croissance ininterrompue des bidonvilles autour des mégalopoles des pays en développement, sous l'effet d'un exode rural menant un nombre considérable de paysans vers la ville et l'espoir d'un emploi, au point d'atteindre en 2007 un tiers de la population urbaine mondiale et 2 milliards en 2030.



Les pays les plus touchés en proportion de leur population sont ceux de l'Afrique Sub-saharienne, avec le Soudan, la République d'Afrique Centrale et le Tchad dépassant les 90% et l'Angola, la Guinée Bissau, le Niger et l'Ethiopie dépassant 80%. Les pays connaissant le plus fort taux de croissance de bidonvilles sont le Chili (9%), le Mozambique (7%), l'Afghanistan (6%), suivi des pays d'Afrique Sub-saharienne, du Cambodge et du Laos (entre 5 et 6%)<sup>7</sup>. A noter qu'en France, 1,7% de la population de la Martinique vit dans des bidonvilles.

<sup>h</sup> Cette composante géographique fut identifiée par le géographe Jean Gottmann en 1961 dans son livre *Megalopolis* où il la définit comme la première mégalopole du monde.



# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

## LA PERIURBANISATION ET L'ÉTALEMENT URBAIN

### L'ACCROISSEMENT DES « TACHES URBAINES » DES PAYS DÉVELOPPÉS

Depuis les années 50, dans les pays développés, l'urbanisation prend essentiellement la forme de la *péri*-urbanisation et de son corrolaire : l'étalement urbain.

L'étalement urbain est défini par l'agence européenne de l'environnement comme « le développement urbain incrémental, non planifié et à faible densité des lisières urbaines ».

Né aux Etats-Unis au début du XXe siècle avec le règne de l'automobile et l'aspiration au style de vie pavillonnaire avec jardin, le modèle des banlieues résidentielles s'est fortement développé dans l'ensemble des pays occidentaux à partir des années 50. Ainsi, depuis la fin des années 50, la surface des villes européennes s'est accrue de 78% tandis que leur population augmentait de 33%, se traduisant par une forte chute de la densité urbaine.

Sur ces territoires urbains européens, l'espace construit a quant à lui augmenté depuis 20 ans de 20%, alors que la population augmentait de seulement 6%, démontrant un accroissement de l'espace résidentiel par personne, qui a plus que doublé en 50 ans<sup>8</sup>.

Une ville comme Palerme par exemple a vu entre le milieu des années 50 et la fin des années 90 sa surface construite augmenter de 200% alors que sa population augmentait de 50%<sup>1</sup>.

L'étalement urbain est particulièrement intense le long des côtes européennes, avec une croissance urbaine supérieure de 30% à celle des territoires intérieurs entre 1990 et 2000, et des taux d'urbanisation maximums sur les côtés portugaises, espagnoles et irlandaises (20-35%)<sup>8</sup>.

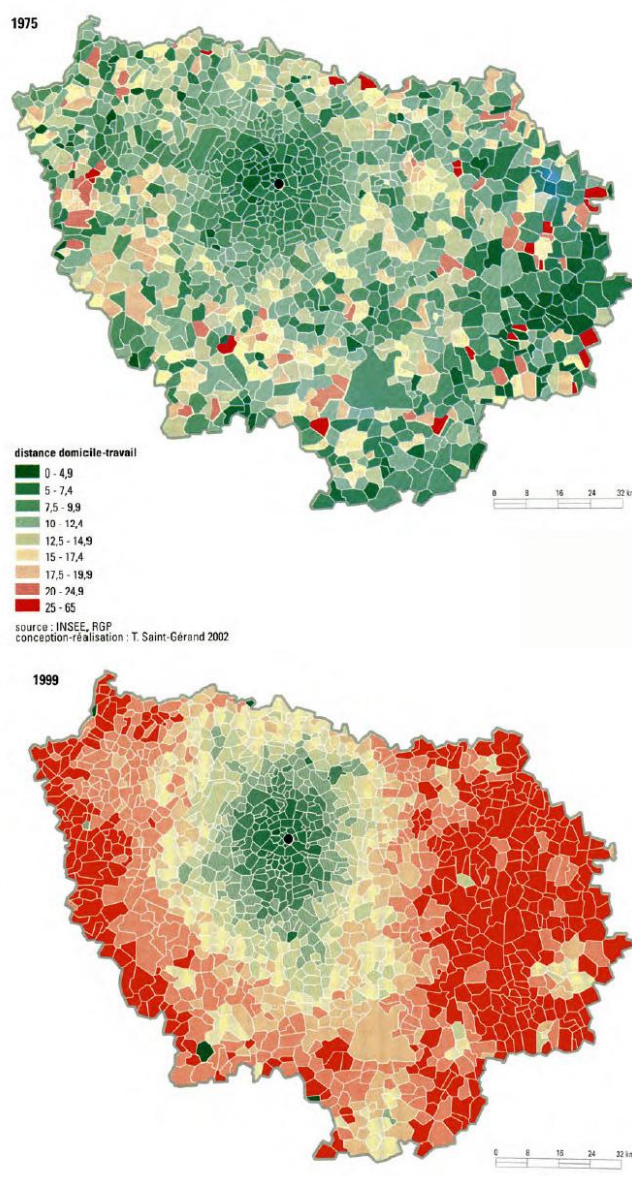
En France, l'INSEE a introduit au milieu des années 90 le concept d'aire urbaine pour mieux appréhender le phénomène d'urbanisation étale autour de centres villes polarisant.

Ainsi dans notre pays, 60% de la population habite dans des communes urbaines, 67% dans des unités urbaines (pas de coupure de plus de 200m dans le bâti), et 77% dans une aire urbaine (pôle urbain + sa couronne périurbaine).

Entre 1999 et 2007, les unités urbaines ont connu une croissance de 3%, alors qu'elle était de 10% dans les couronnes urbaines.

Une autre manière d'appréhender le phénomène est l'évolution de l'éloignement des constructions neuves des aires urbaines aux villes-centres mesurée par l'Insee à partir de la base de données des permis de construire (Sitadel). Entre 1990 et 2000, cette distance a augmenté de plus de 10% et jusqu'à plus de 80% pour 81,2% des 71 aires urbaines étudiées (59% de la population française en 1999), pour atteindre 13 km en moyenne pour les logements neufs, 16 km pour les maisons individuelles et 10 km pour les logements collectifs<sup>9</sup>.

Enfin, même s'il s'apparente à un mitage progressif de territoires originellement non construits et principalement ruraux, le phénomène d'étalement urbain est cumulatif : à l'étalement s'ajoute progressivement l'augmentation de la densité, qui au final fait émerger une zone d'habitation continue en transformant l'aire urbaine en unité urbaine.



<sup>1</sup> MOLAND (JRC) and Kasanko et al., 2006.



---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

Ainsi, sur les 71 aires urbaines étudiées, la densité de construction au km<sup>2</sup> passe de 140 logements en 1980 à 210 en 2008, et cette progression est d'autant plus importante que l'on se situe loin de la ville-centre : « +1% en moyenne annuelle pour la ville-centre, +1,4% lorsque l'on se trouve entre 1 et 25 km de la ville-centre, +2% au-delà de 25 km. »<sup>13</sup>

A l'échelle d'une région comme l'Île-de-France, les deux cartes précédentes montrent de manière flagrante l'augmentation de la distance domicile-travail entre 1975 et 1999 résultant de l'étalement urbain et de la dispersion des programmes sur le territoire régional.

## UN PHENOMENE QUI S'ETEND AUX PAYS EN DEVELOPPEMENT

L'ONU-Habitat indique dans son rapport, « L'Etat des villes dans le monde 2010/2011 : réduire la fracture urbaine »<sup>10</sup>, que l'étalement urbain touche aujourd'hui les pays en développement, avec comme exemples la ville mexicaine de Guadalajara dont la superficie, entre 1970 et 2000, s'est accrue 1,5 fois plus vite que sa population<sup>11</sup>, ou encore Antananarivo à Madagascar, Johannesburg en Afrique du Sud, Le Caire et Mexico, ainsi que certaines villes chinoises.

Contrairement à l'aspect assez homogène de la périurbanisation occidentale, l'étalement urbain des pays en développement revêt deux principaux aspects :

- « l'un est caractérisé par la formation d'importantes zones périurbaines où des modes d'utilisation des sols informels et illicites prédominent [combinés à] l'absence d'infrastructures, des services publics et des services de base insuffisants et, souvent, des transports publics peu développés ou inexistantes et des routes d'accès inadéquates »<sup>11</sup>, à savoir l'extension mentionnée plus haut des bidonvilles.
- « l'autre aspect est l'expansion des banlieues, dans lesquelles des zones résidentielles regroupent des catégories de population à revenu élevé et moyen et des centres d'affaires et de vente au détail facilement accessibles par des moyens de transport individuels »<sup>11</sup>, à savoir les banlieues à l'occidentale et les « gated communities »

Ainsi, l'étalement urbain a tendance à accentuer la fracture urbaine et à favoriser la ségrégation sociale, créant une périphérie urbaine « composée de poches d'ensembles immobiliers isolés et séparés les uns des autres par des grands axes routiers ou des espaces ouverts »<sup>11</sup> à l'instar de la plupart des villes d'Afrique du Sud.

L'ONU pointe du doigt les déficiences de la gouvernance de ces villes, l'absence de planification et d'investissements dans les équipements sociaux.

## LES EXPLICATIONS CLASSIQUES DE L'URBANISATION ET DE L'ETALEMENT URBAIN

Nous avons vu précédemment qu'il y a donc au moins deux grandes formes d'urbanisation : celle des pays développés, lente, essentiellement périurbaine et plus ou moins maîtrisée, et celle des pays en développement, extrêmement rapide, anarchique et socialement fracturée – et peut-être une troisième, celle subie des pays « en panne » ou en guerre civile<sup>j</sup>, comme l'Afrique Sub-saharienne.

Dans la première, comme dans un marché saturé, les villes rivalisent en termes d'attractivité pour attirer investissements, entreprises, commerces, touristes, contribuables,...au risque de mettre en péril leur milieu naturel et la qualité de l'environnement bâti.

Dans la seconde, c'est la révolution industrielle tardive que connaissent les pays en développement, à l'instar de l'Europe et des Etats-Unis au XIX<sup>e</sup> siècle, qui attire une main d'œuvre peu coûteuse s'entassant dans des bidonvilles, avant d'être peut-être un jour intégrée à l'économie et à la ville « formelles ».

Dans tous les cas, l'économie et l'échange ont été les principales raisons classiques invoquées pour expliquer l'urbanisation, que ce soit à travers les analyses des historiens de la ville, comme aujourd'hui des économistes et sociologues.

## L'URBANISATION SOUS L'ANGLE HISTORIQUE

### LES PREMIERES VILLES, RESULTAT DE L'ACCUMULATION DES RICHESSES ET DE LA DIVISION DU TRAVAIL

L'apparition des premières villes dans la Haute-Antiquité est probablement liée à l'accumulation des richesses des civilisations rurales, grâce aux cultures relativement intensives du fait des progrès dans la sélection des semences et du bétail comme dans les outils.

Cette productivité et cette richesse incitent à la spécialisation des personnes dans d'autres domaines que l'agriculture, et particulièrement dans les fonctions artisanales et commerciales, puis administratives, religieuses ou militaires.

La spécialisation des personnes entraîne leur interdépendance et leur regroupement à proximité dans une cité pour faciliter les échanges.<sup>12</sup>

---

<sup>j</sup> 4,5 millions de personnes ont migré vers la ville dans les années 80 au Mozambique en raison de conflits politiques et de guerres civiles – source UN Habitat, 21st session of the governing council, April 2007, Nairobi

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

## LES VILLES MARCHANDES DU MOYEN-AGE

Siegfried Rietschel, juriste et historien du droit allemand de la fin du XIXe siècle avait montré dans ses recherches que toutes les villes de l'Allemagne transrhénane devaient leur origine à des agglomérations de marchands (mercatores) fixés de plus en plus nombreux à partir du Xe siècle sous les murs des bourgs (burgen et civitates): la vie municipale se serait donc développée tout d'abord en dehors des murailles de l'enceinte primitive, dans les faubourgs (suburbia).

Henri Pirenne (1862 – 1935), historien belge spécialiste du Moyen-âge, confirme dès 1898<sup>13</sup> la thèse de Rietschel : « C'est parce que certains endroits sont devenus de bonne heure le centre d'un commerce *permanent* que ces endroits sont devenus des villes. ». Selon lui, la ville est un marché, non pas au sens de Mercatus (marché temporaire réunissant acheteurs et vendeurs intermittents) comme le défendait avant lui l'historien du droit allemand Rudolf Sohm, mais dans le sens de Forum, comme peuvent en attester les noms latins des principales villes du Moyen-âge construits autour de forum, emporium ou portus, désignant des « étapes », des « débarcadères » ou des « places de commerce ». Ainsi en Flandres, la Bruges du XIe siècle est désignée par portu Brugensi, Gand par portu Gandensi ou portu Gandavo, Valenciennes par Valencianis portus.

Les grandes cités du Moyen-âge, à l'origine du phénomène urbain, seraient donc selon lui des colonies de marchands - *de profession* - dont la présence conséquente dès le XIe siècle est attestée par de nombreux textes.

## REVOLUTION INDUSTRIELLE ET CONCENTRATION DU CAPITAL TECHNIQUE, HUMAIN ET FINANCIER DANS LES VILLES

La production de masse rendue possible par la révolution industrielle nécessite la concentration du travail, des moyens de production et du capital en un seul lieu : l'usine, et donc la ville - groupement humain de densité suffisante pour fournir la main d'œuvre nécessaire et limiter les coûts de transaction.

Ainsi, l'économiste anglais Alfred Marshall (1842 – 1924) a observé, dans l'Angleterre de la fin du XIXe siècle, que les entreprises spécialisées dans un domaine se regroupaient en clusters pour augmenter leur productivité. Au sein de ce qui sera appelé un « Marshallian industrial district », chaque entreprise est spécialisée sur une étape de la chaîne de production et en relation commerciale ou en concurrence avec les autres - la proximité des entreprises leur permettant de recruter plus facilement des travailleurs qualifiés et d'échanger rapidement et de manière informelle les informations techniques et commerciales.

Cette théorie semble toujours s'appliquer aujourd'hui, que ce soit à la Silicon Valley aux Etats-Unis ou aux fabricants de disques durs à Singapour ou encore aux fabricants d'écrans plats au Japon.

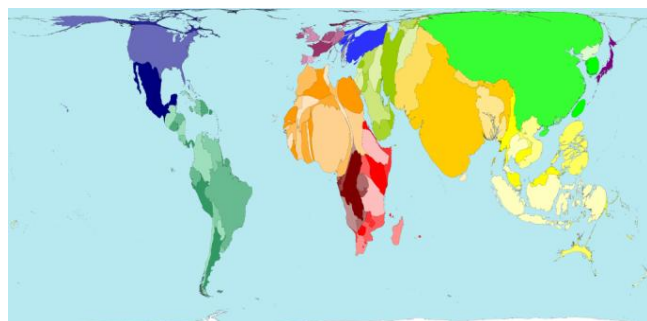
## L'URBANISATION SOUS L'ANGLE ECONOMIQUE

### URBANISATION ET CROISSANCE ECONOMIQUE

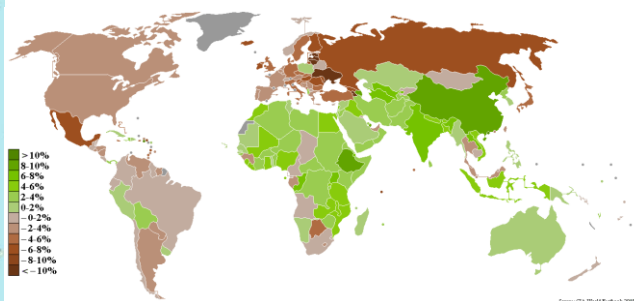
Comme le montre le rapport d'ONU-Habitat de mars 2010, « État des villes dans le monde 2010-2011 : réduire la fracture urbaine », plus un pays est urbanisé, plus les revenus individuels sont élevés.

Ainsi en 2005, les 25 premières agglomérations ont représenté environ 15% du PIB mondial, et les 100 premières 25%, Tokyo en assurant à elle seule près de 2%. En Inde et en Chine, les cinq principales villes représentaient près de 15% du PIB national en 2004.

Ce lien entre croissance économique et urbanisation est aussi observé au niveau régional : côté orientale de la Chine, delta du Mékong au Viet Nam, région méridionale du Mozambique,....



Croissance urbaine – la taille du territoire montre la proportion de nouveaux habitants s'installant dans des villes entre 2002 et 2015. Source : [www.worldmapper.com](http://www.worldmapper.com)

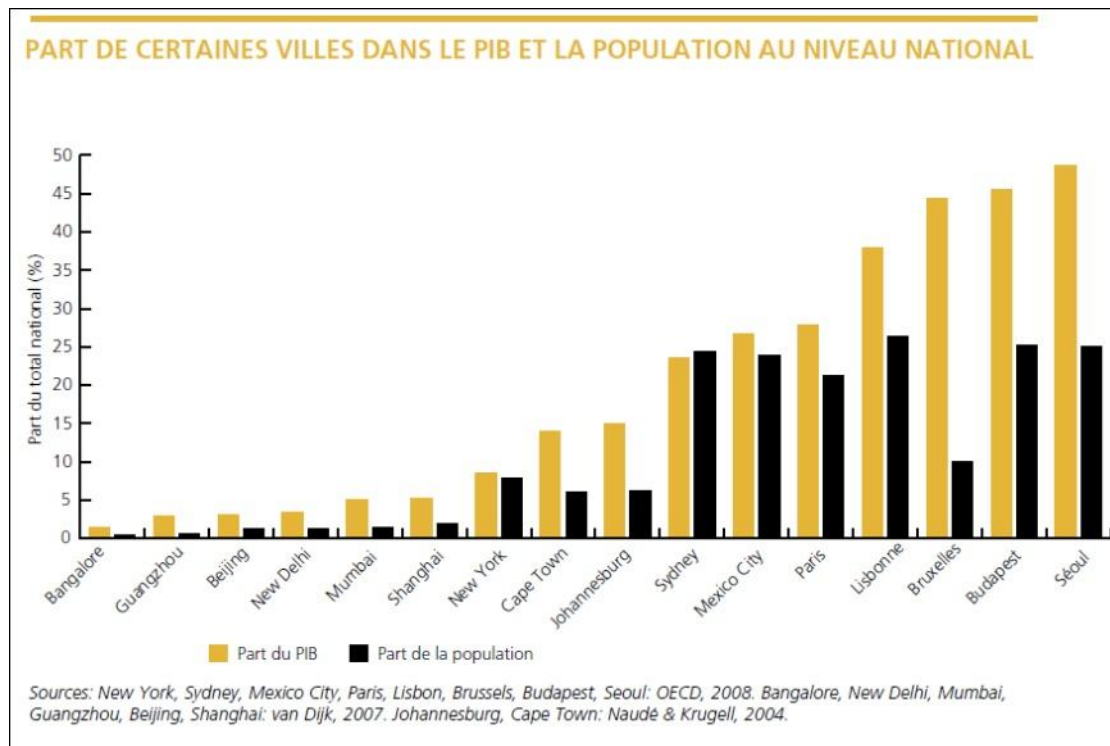


Croissance économique – la couleur verte indique les taux de croissance les plus importants en 2007. Source : CIA Factbook

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

Le rapport montre également qu'à l'échelle d'un pays, il y a généralement moins de pauvreté en zones urbaines qu'en zones rurales dans 90% des cas. Ainsi au Vietnam et au Rwanda, la pauvreté rurale est cinq fois supérieure à celle observée en zones urbaines.<sup>k</sup>

Selon les auteurs du rapport, « le niveau d'urbanisation est associé en certains endroits à de nombreux résultats positifs, comme l'innovation technologique, diverses formes de créativité, le progrès économique, des niveaux de vie plus élevés, un renforcement de la responsabilisation démocratique et l'autonomisation des femmes. [...] La forte concentration de population permet à l'industrie de produire des biens à moindre coût. La densité démographique élevée réduit les coûts de transaction, diminue les dépenses publiques au titre de l'infrastructure et des services et facilite la production et la diffusion des connaissances. »



L'exode rural massif que connaissent les pays en développement est donc alimenté par :

- D'un côté des forces centrifuges :
  - o un accroissement de la population rurale lié à un phénomène de transition démographique, mis à jour en 1934 par Adolphe Landry<sup>14</sup>, économiste français du début du XXe siècle.
  - o accompagné de l'augmentation de la productivité agricole via la mécanisation, qui diminue la main d'œuvre nécessaire et qui crée un fort chômage rural
- De l'autre côté des forces centripètes :
  - o un besoin grandissant de main d'œuvre dans les zones urbaines où sont situées les usines
  - o des conditions de vie en ville qui sur le moyen terme ont tendance à s'améliorer

Dans les pays en développement, comme dans l'Europe du XIXe siècle, cet avantage économique et social des zones urbaines alimente l'exode rural et fait diminuer mécaniquement, selon l'ONU, la pauvreté, comme en Asie de l'Est où cette diminution a été spectaculaire<sup>1</sup>.

La ville serait donc le moyen de production de richesses le plus efficace.

## URBANISATION ET GLOBALISATION DE L'ÉCONOMIE

Mais les causes de l'urbanisation, en particulier des pays en développement, sont loin de n'être que locales. La globalisation et libéralisation de l'économie<sup>m</sup>, la transformation des économies des pays développés en économies des services et de la connaissance - où le secteur tertiaire représente maintenant plus des trois-quarts de la population

<sup>k</sup> Ces résultats sont néanmoins à relativiser, car lorsque l'on tient compte du coût de la vie, la pauvreté urbaine se rapproche de celle observée dans les zones rurales.

<sup>l</sup> . Ce recul est néanmoins loin d'être évident en Amérique latine et dans les Caraïbes ainsi qu'en Afrique du Nord et au Moyen-Orient où les auteurs reconnaissent que « la réduction de la pauvreté enregistrée dans les années 80 s'est immobilisée dans les années 90 » - sans mentionner l'Afrique Sub-saharienne totalement en panne.

<sup>m</sup> General Agreement on Tariffs and Trade (GATT) du 30 octobre 1947, puis Organisation Mondiale du Commerce (OMC/WTO) en 1994.

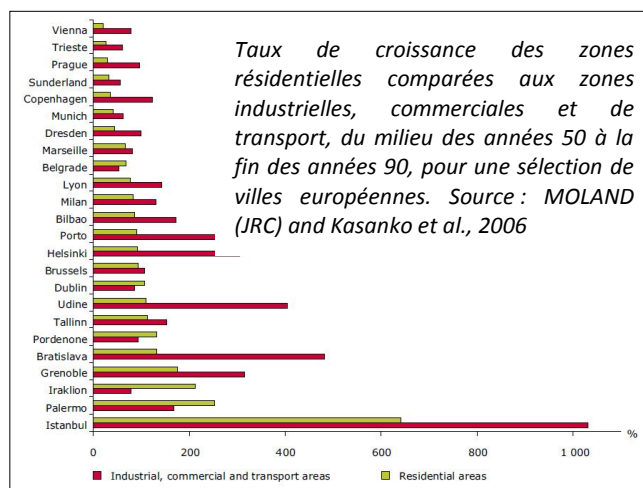
# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

active et du PIB<sup>n</sup> - associé au coût élevé de la main d'œuvre occidentale, ont progressivement transféré dans les pays en développement une grande partie des activités exigeant beaucoup de main d'œuvre, à l'instar de l'industrie, comme peuvent en attester l'investissement direct à l'étranger<sup>o</sup>.

On peut ainsi considérer la première vague d'intense urbanisation, que ce soit celle du XIXe siècle en Europe et aux Etats-Unis ou bien celle d'aujourd'hui dans les pays en développement, comme le résultat de l'industrialisation, relayé localement parfois par un capitalisme d'Etat comme en Chine, et qui, guidé par la maximisation des profits et de la valorisation boursière, cherche systématiquement la diminution des coûts de production, que ce soit ceux du foncier, de l'infrastructure, des matières premières, de la main d'œuvre, des coûts de transport et transaction, ou encore des taxes.

## PERIURBANISATION ET DEVELOPPEMENT DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT ET DE COMMERCE

Aujourd'hui, il semble que le développement économique (installation d'entreprises et de commerces) associé au développement des réseaux de transports et de données (dématérialisation des échanges<sup>15</sup>), soit le principal facteur de l'étalement urbain<sup>8</sup>.



**Drivers of urban sprawl**

**Macro-economic factors**

- Economic growth
- Globalisation
- European integration

**Micro-economic factors**

- Rising living standards
- Price of land
- Availability of cheap agricultural land
- Competition between municipalities

**Demographic factors**

- Population growth
- Increase in household formation

**Housing preferences**

- More space per person
- Housing preferences

**Inner city problems**

- Poor air quality
- Noise
- Small apartments
- Unsafe environments
- Social problems
- Lack of green open space
- Poor quality of schools

**Transportation**

- Private car ownership
- Availability of roads
- Low cost of fuel
- Poor public transport

**Regulatory frameworks**

- Weak land use planning
- Poor enforcement of existing plans
- Lack of horizontal and vertical coordination and collaboration

Ainsi, en Europe, la croissance des zones industrielles et commerciales et des surfaces dédiées aux transports a été deux fois plus rapide que celle des zones résidentielles, occupant en 2006 en moyenne un tiers des surfaces construites, et jusqu'à 50% dans certaines villes.

En France, pour 1m<sup>2</sup> de surface à usage résidentiel, 1m<sup>2</sup> est créé pour d'autres usages (se déplacer, consommer, se distraire, travailler), et le ratio augmente<sup>16</sup>.

La grande majorité de ces nouveaux services s'installent dans la couronne périurbaine, qui offre des terrains bien moins onéreux qu'en centre-ville, voire des terres agricoles reconverties en ZAC (Zone d'Aménagement Concertée<sup>p</sup>) au prix artificiellement bas pour attirer promoteurs immobiliers, entreprises et commerces, avec à la clé emplois et revenus fiscaux pour les collectivités locales.

L'investissement dans les réseaux de transport, en particulier dans le réseau routier et autoroutier, est un stimulant puissant de l'étalement urbain et de l'usage de véhicules particuliers - par opposition à l'investissement dans des transports ferroviaires légers (tramways, métro) qui ont tendance à augmenter la densité d'habitation autour des stations<sup>17</sup>.

En effet, au niveau micro-économique, les ménages font un arbitrage entre le prix du logement et le prix des transports pour aller travailler. Ainsi en région parisienne, l'augmentation du prix du foncier dans les centres villes, puis dans la

<sup>n</sup> En France, le secteur tertiaire emploie environ 75% de la population active (2005) et contribue à hauteur de 77,2% au PIB (2006). Source : INSEE

<sup>o</sup> Source : OCDE StatExtracts - <http://stats.oecd.org/>

<sup>p</sup> En France, les ZAC ont succédé en 1967 aux ZUP de la reconstruction (Zones à Urbaniser en Priorité) et offraient jusqu'en 2000 aux collectivités locales une grande souplesse dans l'aménagement de zones pour les entreprises, commerces ou habitations, d'où l'explosion des zones commerciales avilissant les abords des villes. En 2000, la Loi SRU leur a imposé le respect du Plan Local d'Urbanisme.



# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

petite couronne, combiné à un coût relativement faible des transports en commun et de l'automobile, pousse les gens à s'installer en couronne périurbaine, parfois à plus de 50km de leur lieu de travail.

De nombreux autres facteurs macro- ou micro-économiques, démographiques, sociétaux et réglementaires, renforcent le phénomène d'étalement urbain (voir « Drivers of urban sprawl » page précédente).

## L'URBANISATION SOUS L'ANGLE DE LA CREATIVITE

### URBANISATION ET CREATIVITE

Si l'attraction exercée par les villes des pays en développement, ou celles des pays industrialisés au XIXe siècle, tient essentiellement, pour les investisseurs, à des coûts de production minimaux, et pour les travailleurs eux-mêmes, à la possibilité de trouver un emploi, celle des villes des pays développés est plus complexe.

Nombre de chercheurs en développement urbain et régional<sup>9</sup> ont mis en avant très tôt le rôle des villes comme incubateur de créativité, d'innovation et de création d'entreprises. Robert Putnam (1941), politologue américain, professeur à Harvard, a lui montré l'importance du facteur relationnel, le « capital social »<sup>18</sup> - par opposition au capital physique (machines) - dans la croissance économique locale, grâce à des communautés où les personnes et les entreprises ont des liens extrêmement forts (famille, amis, voisinage, clubs civiques, partis politiques, cercles religieux,...).

Richard Florida (1957), géographe et docteur de l'Université Columbia en aménagement urbain, a identifié quant à lui la montée en puissance d'une « classe créative »<sup>19</sup> constituée de chercheurs, ingénieurs, architectes, enseignants, écrivains, artistes, comédiens et autres professions dont la fonction économique est de créer de nouvelles idées, d'inventer de nouvelles technologies, de produire de nouveaux contenus.

Selon Richard Florida, cette nouvelle classe représenterait 40 millions de personnes aux Etats-Unis et 30% de la population active américaine, et serait la clé de la

croissance économique pour les villes réussissant à l'attirer, mais également à traduire cet avantage en résultats économiques tangibles sous la forme de nouvelles idées et nouveaux business, à l'instar de la Silicon Valley.

La clé ne serait donc plus d'attirer des entreprises par des incitations fiscales, politique menée par les villes jusqu'à présent, mais de savoir comment attirer et fidéliser cette nouvelle « classe créative », et de transformer ce « capital humain » en croissance économique.

Florida doit beaucoup à Jane Jacobs qui, dès 1964, avait identifié l'importance pour les villes d'attirer des gens créatifs afin de stimuler la croissance économique, phénomène que le prix Nobel d'économie (1995) Robert Lucas (1937) a dénommé par la suite « l'externalité de Jane Jacobs ». Lucas, comme ensuite Edward Glaeser (1967), économiste à Harvard, ont démontré que la concentration du capital humain était le facteur central de la croissance économique d'une région.

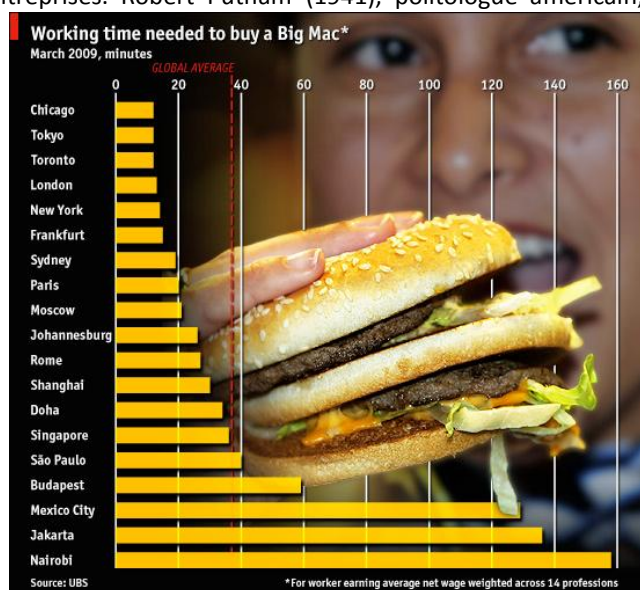
Contrairement aux communautés fortement liées de Putnam, Florida pense que les nouvelles communautés de la classe créative ont des liens beaucoup plus faibles, mais sont plus aptes à créer de la croissance économique car beaucoup plus flexibles, à une époque où la vitesse d'adaptation et d'innovation est clé.

### L'ATTRACTIVITE URBAINE ET LES ATTRACTEURS URBAINS

Les villes sont donc entrées dans une ère de concurrence, à l'instar des entreprises, pour attirer durablement contribuables et entreprises, afin d'assurer leur développement économique et culturel. Fleurissent pléthore de classements et comparaisons de villes sur les villes les plus chères, les villes les plus vertes, les villes où la qualité de vie est la meilleure, les villes où l'on se sent le plus en sécurité,...autant de critères différents à la base de l'attractivité des villes.

L'attractivité urbaine représente la force d'attraction qu'une ville exerce sur ses habitants, ses entreprises et organisations (rétention), ou bien celles et ceux qui pourraient s'y installer (attraction).

Elle se mesure de manière déclarative, à travers des questions du type « souhaiteriez-vous quitter la ville dans laquelle vous habitez ? », « Aimerez-vous que vos enfants grandissent dans la ville dans laquelle vous habitez ? », ou par

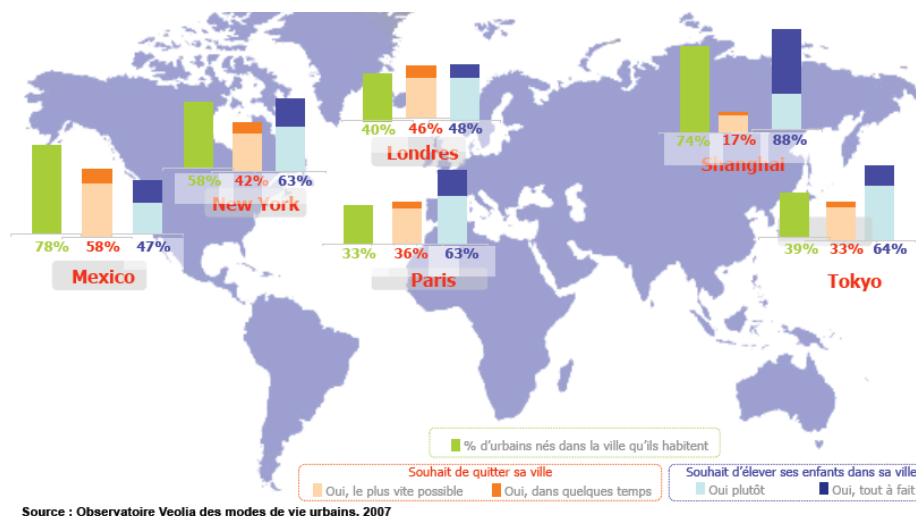


<sup>9</sup> Robert Park (1925), Edward Ullman (1958), Jane Jacobs (1961, 1969, 1984), Wilbur Thompson (1965)



# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

l'observation d'indicateurs clés, comme la proportion de personnes vivant dans la ville dans laquelle elles sont nées, ou le taux d'immigration de différentes classes socioprofessionnelles, ou encore le niveau d'investissements d'entreprises nationales ou étrangères.



Julien Damon, professeur associé à Sciences Po, travaille depuis plusieurs années sur l'attractivité des villes<sup>20 21</sup>, politique quasi-marketing de ciblage et positionnement de plus en plus utilisée par les élus territoriaux pour attirer habitants, entreprises, ou touristes, en se différenciant de ses voisins – d'où l'appellation de « marketing territorial ».

Selon lui, l'attractivité urbaine se définit tout d'abord par sa cible, à savoir qui une ville veut attirer. S'agit-il d'hommes ou de femmes ? D'habitants ou de touristes ? D'activités industrielles ? Commerciales ? Tertiaires voire tertiaires supérieures ?

La deuxième question est à quel niveau et en quels lieux veut-on attirer ses cibles. Attirer les activités de recherche d'un géant de l'électronique mondial ne peut se faire efficacement que si une main d'œuvre suffisamment abondante et hautement qualifiée existe dans un bassin d'emploi de 50 km<sup>2</sup> ou à moins d'une heure de transport. L'attractivité est tout au moins régionale, voire nationale. Revitaliser un quartier avec de l'artisanat nécessite une attractivité à une échelle plus locale.

La troisième question est celle du comment. Julien Damon et François de Jouvenel, directeur d'études de la revue de prospective Futuribles, ont réalisé en 2010 pour la Fabrique de la Cité<sup>f</sup> une étude sur l'attractivité des villes dans laquelle ils identifient 10 facteurs d'attractivité :

	Ressources objectives	Ressources symboliques
1. Composante géographique	<ul style="list-style-type: none"> <li>Géographie physique : proximité de la mer, d'un fleuve, zone frontalière, espaces naturels, etc.</li> <li>Le territoire tel qu'il a été façonné à travers l'histoire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Va leur paysagère attribuée au territoire</li> <li>Va leur symbolique (lieu de mémoire, etc.)</li> </ul>
2. Composante géopolitique	<ul style="list-style-type: none"> <li>Position au sein des réseaux interurbains</li> <li>Accessibilité</li> <li>Externalités de réseau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sentiment de centralité</li> </ul>
3. Composante patrimoniale	<ul style="list-style-type: none"> <li>Monuments du passé, partie intégrante de l'identité de la ville</li> <li>Monuments historiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Réalizations récentes et attirantes, gages de modernité</li> </ul>
4. Composante démographique	<ul style="list-style-type: none"> <li>Poids et dynamisme démographiques</li> <li>Caractéristiques des populations présentes et évolutions récentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Image des populations et de leurs modes de vie</li> </ul>
5. Composante économique	<ul style="list-style-type: none"> <li>Croissance du PIB, situation du marché de l'emploi, rémunérations, inégalités</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Image de la ville auprès des actifs, des entrepreneurs et des médias</li> </ul>
6. Composante sociale	<ul style="list-style-type: none"> <li>Qualité de vie (commerces, offre de loisirs, criminalité, environnement, etc.)</li> <li>Capacité à intégrer les populations présentes sur le territoire, notamment les nouveaux entrants, et à faire cohabiter des populations différentes</li> <li>Coût de la vie, coût du logement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Image de la ville, qualité de vie, convivialité, ambiance, ouverture des habitants perçues par les ménages (locaux ou extérieurs) et par les médias</li> <li>Cosmopolitisme mesuré et vécu</li> </ul>
7. Composante infrastructurelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Offre d'équipements et services aux personnes</li> <li>Ressources éducatives (de maternelle à université)</li> <li>Services sanitaires et sociaux</li> <li>Services de mobilité (du vélo aux aéroports)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Appréciations et réputations de la qualité des services</li> </ul>
8. Composante institutionnelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Position dans le système politique national et international</li> <li>L'organisation du pouvoir local</li> <li>Montant des recettes fiscales</li> <li>Politiques sociales locales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rayonnement politique de la ville</li> <li>Image médiatique des élus</li> <li>Rayonnement national ou international des élus</li> </ul>
9. Composante culturelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Infrastructures culturelles</li> <li>Monuments historiques et architecturaux</li> <li>Sites touristiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Notoriété médiatique</li> </ul>
10. Composante environnementale	<ul style="list-style-type: none"> <li>Espaces verts</li> <li>Politiques de développement durable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capacité à être reconnue comme ville responsable et durable</li> </ul>

<sup>f</sup> Pôle d'étude sur la ville de demain de VINCI – [www.lafabriquedelacite.com](http://www.lafabriquedelacite.com)

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

Damon et de Jouvenel soulignent que l'inertie des phénomènes d'attraction nécessite d'anticiper les grandes tendances économiques, sociétales et démographiques afin de mettre en place des politiques urbaines adaptées. Ainsi sur la dimension démographique, le vieillissement généralisé de la population européenne appelle à la mise en place d'une offre de soins de qualité et de proximité.

Le tableau suivant illustre les facteurs d'attractivité ou de répulsion potentiels sur la dimension des rapports sociaux.

<b>Rapports aux autres, au temps et à l'espace</b>			
<b>Tendances</b>	<b>Enjeux pour les villes</b>	<b>Facteurs d'attractivité potentielle</b>	<b>Facteurs de répulsion potentielle</b>
<b>8. Diversification des liens sociaux</b>	La tendance est à la multiplication des liens sociaux. Liens qui ne sont pas nécessairement durables ou solides.	Les opportunités concrètes données par la ville au tissage et à l'expression de ces liens multiples peuvent constituer un facteur d'attractivité.	Diversification non acceptée
<b>9. Accélération des rythmes sociaux et étalement des temps</b>	Le temps est de plus en plus dense et les journées de plus en plus étalées.	Adaptation des rythmes de la ville aux rythmes des individus : l'étalement des horaires de transport en premier lieu.	La rigidité des cadres de la législation du travail.
<b>10. Croissance des distances</b>	Hausse liée à l'étalement des espaces urbains.	Maintenir la capacité des individus à joindre de plus en plus de lieux.	Enfermement dans des espaces fonctionnels et peu diversifiés.
<b>11. Fragmentation territoriale croissance (surtout du fait des classes moyennes)</b>	L'enjeu pour les villes peut être d'accompagner ce processus de ségrégation inhérent aux comportements des différentes classes sociales.	Une gouvernance urbaine centrée sur la gestion des flux (de voyageurs, de biens, d'informations, de déchets), mais peu sur les autres aspects (foncier urbanisme, etc.).	Politiques foncières et du logement
<b>12. Séduction pour l'image de la ville</b>	L'image de la ville est un facteur d'attractivité à la fois absolu et relatif.	Mise en valeur du patrimoine historique.	Enfermement peu dynamique dans un type d'image (musée).
<b>13. Aspiration à la réalisation de soi et importance croissante des offres de loisir</b>	L'individuation, l'essor des valeurs dites post-matérialistes, mais aussi la diminution des temps de travail et l'augmentation moyenne du pouvoir d'achat.	Les villes peuvent être des lieux d'expression de ces aspirations sociales : « l'air de la ville rend libre ».	Les villes peuvent être des lieux de contraintes face à ces aspirations sociales

## TROUVER UN CADRE CONCEPTUEL APPROPRIÉ À LA COMPLEXITÉ URBAINE

Bien qu'offrant un éclairage fort intéressant sur la dynamique urbaine, ces différentes approches restent néanmoins parcellaires, soit parce qu'elles sont issues d'une discipline en particulier (approche historique, approche économique, approche sociale,...), soit parce qu'elles tentent d'expliquer ces phénomènes à posteriori, dans une démarche analytique et réductionniste.

Les villes semblent être des organismes quasi-vivants, dont le développement échappe le plus souvent aux volontés de planification, à l'instar des villes nouvelles de la région parisienne dans les années 60 qui jamais n'atteignirent la population projetée, alors que Paris et sa banlieue continuaient inexorablement de s'étaler, au point aujourd'hui de les englober.

La ville peut être considérée comme un système complexe, au sens propre, comme au sens scientifique, dans le cadre de la théorie des systèmes complexes.

Nous nous proposons dans le chapitre suivant de montrer en quoi l'apport de cette science transdisciplinaire, au croisement de la biologie, de la physique, de la chimie, des mathématiques, de la robotique et des sciences sociales, peut apporter un cadre conceptuel et scientifique permettant d'articuler les différents apports vus précédemment dans une nouvelle heuristique de l'émergence des systèmes complexes.

## **II. SYSTEMES COMPLEXES ET EMERGENCE, UN NOUVEAU PARADIGME POUR COMPRENDRE LA VILLE**

### **LA THEORIE DES SYSTEMES COMPLEXES ET DE L'EMERGENCE**

La découverte en 1915 par D'Arcy Thompson du processus de morphogénèse<sup>22</sup> est à l'origine d'un changement radical de paradigme dans la compréhension du fonctionnement du vivant : un renversement d'une approche descendante de classification du vivant et de sélection naturelle Darwinienne, à une approche ascendante d'auto-organisation du vivant à partir de briques élémentaires et d'interactions simples, dont émergent des organismes aux propriétés supérieures.

Ce nouveau champ de recherche sur les systèmes complexes s'est fortement développé depuis les années 50 sous l'impulsion de mathématiciens de génie, qui n'hésitaient pas à travailler au croisement de la biologie, des mathématiques, de la physique, de la sociologie et de la philosophie.

La théorie des systèmes complexes a des applications aujourd'hui dans un grand nombre de domaines, depuis la reconnaissance de caractère ou de la parole, jusqu'à des jeux de simulation, en passant par l'optimisation du trafic sur Internet ou la modélisation des mouvements de foules dans les stades.

### **LA « COMPLEXITE ORGANISEE »**

Warren Weaver (1894 – 1978), mathématicien américain, directeur du département des Sciences Naturelles à la Rockefeller Foundation (1932-55), et co-auteur avec Claude Shannon (1916 – 2001) de l'ouvrage fondateur de la théorie de l'information, *The Mathematical Theory of Communication*<sup>23</sup>, a rédigé à la fin des années 50 un long rapport pour la fondation Rockefeller<sup>24</sup> qui peut être considéré comme le texte fondateur de la théorie des systèmes complexes.

Dans ce rapport, Weaver distingue trois directions prises par la recherche scientifique durant les derniers siècles :

1. L'étude de systèmes simples, avec 2 ou 3 variables, tels que la rotation des planètes autour du soleil, ou bien la relation entre le courant électrique, son potentiel et la résistance du conducteur.
2. L'étude de systèmes complexes désorganisés, caractérisés par des millions ou milliards de variables, comme le comportement des molécules dans un gaz, et qui peuvent être approchés uniquement des méthodes statistiques et probabilistes, à l'instar du travail de Claude Shannon
3. L'étude de systèmes complexes organisés, qu'il appelle « organized complexity », traitant d'un nombre moins important de variables, mais surtout, de variables interdépendantes et en interaction.

Weaver aura à travers ce texte réussi à rassembler sous cette appellation un ensemble de travaux disparates, dans des domaines allant de la biologie à la physique en passant par les mathématiques, qui tous pourtant avaient en commun une approche similaire de la complexité : l'auto-organisation et l'émergence.

### **LA SYMBIOGENESE, OU COMMENT UN ORGANISME COMPLEXE POUVAIT RESULTER DE LA SYMBIOSE D'ORGANISMES SIMPLES**

Dès 1909, le botaniste russe Konstantin S. Merezhkovsky (1855-1921) jetait les bases de la symbiogenèse, qui proposait un complément assez controversé au Darwinisme, à savoir que les organismes complexes pouvaient résulter de la symbiose de formes vivantes plus simples.<sup>25</sup> Cette théorie fût étendue par la suite par Boris Mikhaylovich Kozo-Polyansky (1890-1957) à l'endosymbiose, un ensemble d'événements et de processus évolutifs qui ont conduit à la formation des organites (mitochondrie et chloroplaste) dans les cellules eucaryotes. Pour Merezhkovsky et Kozo-Polyansky, la vie représentait le point culminant d'une succession de coalitions entre organismes plus simples, eux-mêmes descendant de composants issus du non-vivant. Cette théorie, qui fût tout d'abord rejetée par la communauté scientifique, est aujourd'hui largement acceptée, notamment suite aux travaux de la microbiologiste Lynn Margulis (1938) - coauteur par ailleurs, avec le scientifique anglais James Lovelock, de l'hypothèse Gaïa.

### **LA MORPHOGENESE, OU L'EMERGENCE DE LA FORME PAR LES PROCESSUS**

#### **L'EMERGENCE DE LA FORME PAR LES PROCESSUS**

Comme l'avait identifié le biologiste et mathématicien écossais D'Arcy Thompson (1860 – 1948) au début du XXème siècle dans *On Growth and Form (1917)*<sup>26</sup>, et contrairement à la théorie alors dominante de la sélection naturelle de Darwin, les formes et comportements des organismes biologiques émergent de processus internes en interaction dynamique avec leur environnement.

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

Cette adaptation dynamique, que l'arbre réalise par exemple de son vivant lors de sa croissance, donne également lieu à un long et lent processus d'adaptation et d'optimisation des formes à leur milieu à l'échelle de l'évolution des espèces.

En d'autres termes, les organismes vivants s'adaptent à leur environnement, et sont capables de faire évoluer leur forme et leur comportement pour maintenir leur intégrité et continuité.

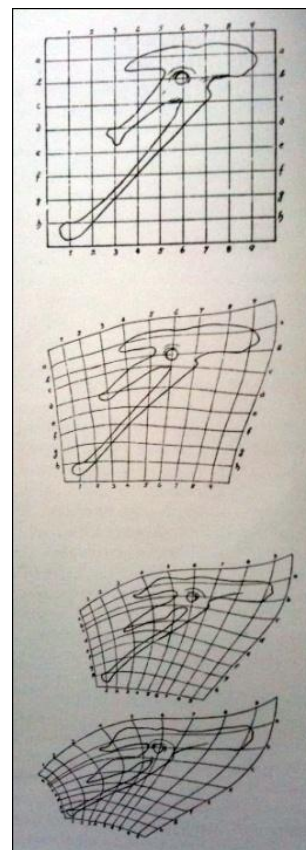
Mais les transformations que d'Arcy Thompson avait modélisées mathématiquement restaient encore à expliquer d'un point de vue logique, chimique, physique et biologique.

## PROCESSUS « MORPHOGENETIQUE »

Alan Turing (1912 – 1954), mathématicien britannique surdoué considéré comme le père fondateur de l'informatique et de la programmation, a élaboré un modèle biomathématique de la morphogénèse paru en 1952 dans *The chemical basis of morphogenesis*<sup>27</sup> où il démontre le caractère géométrique prévisible de la morphogénèse à partir d'un modèle chimique de réaction-diffusion - qui ne sera confirmé qu'en 1990 par des expériences de chimie.

Sa démonstration prouve en particulier que ce n'est pas la forme de l'organisme qui est génétiquement codé, mais *le processus d'auto-génération de la forme dans un environnement donné*, la forme finale résultant de la génération et de l'assemblage de cellules selon leur code génétique et l'environnement dans lequel elles se développent. Les bases de l'approche biochimique étaient posées.

En 1968, le biologiste Hongrois Aristid Lindenmayer (1925 – 1989) exploitera les travaux de Turing et parviendra à modéliser des schémas de croissance d'organisme multicellulaires simples à partir du nombre et de la taille des cellules, de leur spécialisation, de règles géométriques d'agencement et de contraintes environnementales - schémas toujours exploités aujourd'hui en modélisation morphogénétique (« L-systems »)<sup>5</sup>.



*Pelvis d'un Archaeopteryx évoluant vers celui d'un Apatornis*

## BIOLOGIE DU DEVELOPPEMENT

Les travaux de D'Arcy Thompson, Turing ou Lindenmayer, dans la lignée de ceux de Jean-Baptiste Lamarck (1744 – 1829), Karl Ernst von Baer (1792 – 1876) ou Jacob Moleschott (1822 – 1893), déboucheront sur la naissance d'un domaine de recherche aujourd'hui en plein essor : la biologie du développement, à savoir l'étude de la croissance et du développement d'organismes. Ce développement comprend la croissance des cellules, tant en nombre qu'en taille, la différenciation des cellules, leur permettant d'acquiescer chacune un type précis (peau, organe interne,...), et la morphogénèse qui décrit la forme prise par les différents éléments de l'organisme et leur position dans celui-ci, ainsi que la forme globale résultante de l'organisme.

Il est acquis aujourd'hui que l'auto-organisation en biologie est un processus par lequel l'organisation interne d'un organisme s'adapte à son environnement, à travers de multiples générations, pour faire émerger des propriétés appropriées.

## L'INTELLIGENCE COLLECTIVE, OU COMMENT UNE INTELLIGENCE PEUT EMERGER D'INTERACTIONS PHYSICO-CHIMIQUES

En 1956, l'entomologiste Edward O. Wilson (1929) démontre à Harvard que les fourmis communiquent entre elles et se coordonnent en reconnaissant des motifs dans les traces de phéromone laissées par leurs congénères, et non en répondant aux ordres d'une Reine pondreuse. Le comportement complet de colonies de fourmis sera progressivement mis à jour à partir d'une dizaine de règles de base, d'un système de communication basé sur la concentration de phéromone et son temps d'évaporation, et d'un degré de conscience de la fourmi...nul, démontrant ainsi que des propriétés et comportements avancés au niveau d'un groupe pouvaient émerger de règles et individus extrêmement simples à la base. Les bases de l'intelligence collective étaient posées.

Ces travaux seront suivis à la fin des années 60 de ceux d'Evelyn Fox Keller (1936) et de Lee Segel (1932 – 2005)<sup>28</sup>, une physicienne et un mathématicien américains, sur les myxomycètes (slime mold *dictyostelium discoideum*), organisme composé de cellules indépendantes pouvant se séparer ou s'assembler en essaim en fonction des conditions de

<sup>5</sup> Voir plus loin: *Concevoir une écologie urbaine avec la modélisation des L-Systems*



---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

l'environnement, notamment pour se nourrir, en communiquant de manière similaire aux fourmis (molécule « Cyclic AMP » à la place de phéromone).

## AUTO-ORGANISATION DE SYSTEMES COMPLEXES ET EMERGENCE

Toutes ces découvertes expliquent sous un angle différent et de manière complémentaire le phénomène d'auto-organisation de systèmes complexes et l'apparition de propriétés émergentes par augmentation de la complexité du système (diversité, connectivité) - des propriétés du système non déductibles par l'analyse des parties de ce système (« l'ensemble fait plus que la somme de ses parties ») - qui à leur tour vont permettre à l'organisme d'être mieux adapté à son environnement.

Elles seront confirmées par les dernières découvertes en génétique, qui démontreront que les caractéristiques observables d'un organisme (son phénotype) résultent à la fois de son patrimoine héréditaire (son génotype), et des échanges d'informations et d'énergie avec son environnement, qui sur plusieurs générations, vont appliquer des modifications au génotype et favoriser son adaptation.

La grande force de cette nouvelle approche des systèmes complexes est donc de permettre de comprendre l'apparition d'organismes aux comportements complexes et d'une grande variété, à partir d'éléments unitaires et de règles d'interaction locales très simples. Toutes les caractéristiques avancées des organismes vivants découleraient donc uniquement de l'auto-organisation de cellules spécialisées en des systèmes complexes à forte diversité et connectivité selon un code génétique évoluant sous l'influence de l'environnement.

## LA VILLE COMME EVOLUTION ET EMERGENCE DE SYSTEMES SOCIAUX COMPLEXES

Les grandes lignes de la théorie des systèmes complexes étant posées, comment maintenant les appliquer au phénomène urbain ?

### LE TROTTOIR, MEDIA DES CITADINS

Etonnamment, l'appel de Warren Weaver à approfondir la recherche dans le domaine des systèmes complexes auto-organisés eut un écho quasi-immédiat en urbanisme. Il se trouve que Jane Jacobs avait lu, au moment où elle rédigeait ce qui allait devenir le traité d'urbanisme le plus influent de l'histoire des Etats-Unis, *The Death and Life of the Great American Cities*,<sup>29</sup>, l'appel de Weaver, et qu'elle invoque fortement la théorie de systèmes complexes auto-organisés comme seule approche possible pour comprendre la ville, depuis les phénomènes d'interaction au niveau des trottoirs, jusqu'au niveau des quartiers où s'assemblent des communautés par affinités, et au niveau de la ville entière vue comme un organisme vivant, capable de s'adapter.

« Dans les quartiers qui fonctionnent bien sur certains aspects et mal sur d'autres (comme c'est souvent le cas), nous ne pouvons pas analyser les vertus et les défauts, diagnostiquer les problèmes ou envisager des améliorations, sans approcher ces problèmes comme des problèmes de complexité organisée [systèmes complexes auto-organisés] »<sup>29</sup>.

Depuis la fin de la guerre, la planification urbaine était radicalement une démarche « top-down » consistant à éradiquer la violence sévissant dans les poches de pauvreté et les taudis en rasant ces derniers au profit de grands ensembles. Certes les appartements de ces cités représentaient un progrès en termes de confort (eau courante, sanitaires, chauffage urbain,...), mais le voisinage se transforma vite en zones de non-droit et de violence, en contradiction totale avec les objectifs initiaux.

En octobre 1961, la New York City Planning Commission décida de raser le quartier historique de West Village à Manhattan pour y construire des barres d'immeubles. Ce projet souleva une vive opposition au sein de la communauté locale, dont la figure de proue n'était autre que la critique d'urbanisme Jane Jacobs (1916 – 2006).

Jane Jacobs s'attaqua aux politiques de planification urbaine modernistes qui, selon elle, étaient responsables de la mort de nombreuses communautés urbaines. Pour elle, raviver un quartier ne consistait pas à passer les zones à problèmes au bulldozer mais à identifier les rues qui fonctionnaient et s'en inspirer, en partant du niveau de la rue, voire du trottoir :

« Derrière le désordre apparent de la vieille ville, partout où la vieille ville fonctionne correctement, existe un ordre merveilleux pour maintenir la sécurité des rues et la liberté de la ville. C'est un ordre complexe. Son essence repose sur l'intimité de l'usage des trottoirs, qui fait se succéder constamment les regards. » (Jane Jacobs, Op. Cit.)

Jacobs voit le trottoir comme un média permettant l'échange d'informations entre citoyens. Non pas uniquement l'échange verbal d'informations entre voisins, mais l'échange riche de signaux entre parfaits inconnus. Le trottoir est un espace à la bonne échelle, permettant à la fois le bon type et la bonne fréquence d'interactions locales, à l'origine de propriétés émergentes du quartier : sécurité, équilibre, spécialité, composition sociale,... Les trottoirs sont en quelque sorte la phéromone des citoyens d'où peuvent émerger des propriétés supérieures au niveau du quartier.



---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

« Dans la démocratie populaire de la genèse des quartiers, nous votons avec nos pieds »<sup>30</sup>

## LOIS D'ATTRACTION/REPULSION ET BOUCLES DE RETROACTION LOCALES, MOTEURS DES QUARTIERS

En 1969, l'économiste américain Thomas Schelling (1921), prix Nobel d'économie 2005 pour son apport à la théorie des jeux en stratégie, publie un article décrivant le mécanisme de la ségrégation.<sup>31</sup> Il y démontre qu'une petite inclinaison en faveur de voisins de même couleur peut mener à une ségrégation totale dans une zone donnée. Le phénomène est basé sur une boucle de rétroaction positive séparation – préjudice – discrimination – séparation qui s'auto-entretient jusqu'à la ségrégation totale entre communautés, que ce soit sur des critères de genre, âge, race, ethnie, langage, religion ou préférences sexuelles.

Les signaux s'échangent au niveau de la rue – du trottoir de Jane Jacobs – et peuvent donc également laisser émerger des propriétés discriminantes, en renforçant certains signaux par ces boucles de rétroaction positives locales.

L'économiste américain Paul Krugman (1953), également prix Nobel d'économie (2008), a modélisé, en se basant sur les modèles de théorie des jeux de Schelling, comment les entreprises se répartissaient géographiquement en fonction d'un équilibre entre forces centripètes (pour partager une zone de chalandise par exemple) et centrifuges (pour éviter une concurrence trop directe par exemple). Après plusieurs itérations, et quelque soit la disposition initiale des entreprises, celles-ci se rassemblent en grappes, en clusters clairement séparés, démontrant par la-même l'émergence d'une forme et de propriétés distinctes au niveau territorial, à partir de règles d'interactions locales.

Le géographe américain James E. Vance Jr. (1926 – 1999) décrit l'effet de territorialisation similaire issu de ces deux processus opposés : l'agrégation et la ségrégation :

« Les activités qui se développent dans les villes ont une forte propension à se regrouper dans des zones spécialisées bien délimitées sous l'attraction de relations internes entre elles. Que ce soit par l'utilisation de ressources matérielles communes ou par la pratique d'une religion ou d'un langage, la pratique institutionnelle donne forme au processus d'agrégation, qui est induit de l'intérieur [...]. Par opposition à une agrégation, on peut trouver des rassemblements identiques de personnes similaires induits par des forces externes. Au lieu d'être attirés les uns aux autres, ils sont contraints de se rassembler par des forces de ségrégation. »<sup>32</sup>

Comme pour la boucle de ségrégation de Schelling, ou d'agrégation de Krugman, ces règles s'appliquent donc également au sein de quartiers, formés de milliards d'interactions quotidiennes entre citoyens au niveau de la rue, renforçant certaines dynamiques à l'échelle urbaine, par des lois d'attractivité / répulsion décrites par Vance, et menant aux quartiers gays, chinois, bobos, ou encore au quartier des pizzerias à Grenoble, à celui du textile au Sentier à Paris, ou encore les tisseurs de soie de Florence, la Guilde de Por Santa Maria, présents dans le même quartier depuis presque mille ans.

La ville est donc une sorte d'amplificateur de phénomènes récurrents, et ses quartiers le reflet du comportement répété de milliers d'individus, qui leur est renvoyé en une boucle de rétroaction positive à l'origine de l'amplification.

## LA VILLE, SYSTEME DE MANAGEMENT DE L'INFORMATION ET DE L'INNOVATION

L'émergence de ces formes et spécificités urbaines à partir de milliards d'interactions locales et de boucles de rétroactions positives apporte une propriété essentielle au niveau encore supérieur de la ville elle-même : celle de faciliter le management de l'information pour ses citoyens.

En effet, le processus d'agglomération décrit plus haut aboutit à un système de classement et de partage de l'information à l'échelle de la ville.

Ainsi, les ébénistes de la rue du Faubourg-Saint Antoine à Paris ont pu pendant des siècles s'échanger leurs meilleures pratiques, soit librement, soit lorsqu'un apprenti quittait l'atelier du maître pour s'installer à quelques pas, comme également accéder plus facilement à des services spécialisés (approvisionnement centralisé, logistique partagée, infrastructure de production, fournisseurs de matériel,...), entraînant des économies d'échelle conséquentes. Cet avantage du cluster augmentait leur compétitivité, éliminait les concurrents isolés, et renforçait par une boucle de rétroaction positive la vitalité du « quartier des ébénistes ».

L'échange d'informations était également faciliter avec le reste de la population : les nobles et bourgeois parisiens savaient tous qu'il fallait se rendre dans ce quartier pour faire fabriquer ou restaurer un meuble, tout comme les jeunes compagnons d'autres villes d'Europe qui souhaitaient venir y faire leurs armes.

Comme l'analyse Steven Johnson (1968), écrivain best-seller américain et co-fondateur de Feed, l'un des webzines indépendants les plus lus sur la technologie, la culture et la politique : « la ville, bien avant les écrans de nos ordinateurs, est une interface d'échange et de navigation informationnelle, une innovation technologique à part entière, qui rapproche les individus similaires en clusters cohérents et identifiables et facilite l'échange de biens et d'idées en leur sein, renforçant par là-même leur efficacité. »<sup>33</sup>

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

L'efficacité de cette innovation est certainement à l'origine même du succès des premières villes, il y a 3.500 ans, qui pouvaient ainsi incuber et développer de nouvelles idées, comme la charrue, la roue du potier, ou l'astronomie et la médecine, beaucoup plus efficacement que n'auraient pu le faire des individus isolés.

## LA VILLE, SUPERORGANISME AUTOPOÏÉTIQUE

Comment se fait-il dès lors que l'urbanisation ne se soit pas généralisée beaucoup plus vite ? Et pourquoi a-t-elle-même connu des récessions, à l'instar des cinq siècles qui ont suivi la chute de l'Empire Romain ? Là encore, la théorie des systèmes complexes, en particulier dans l'apport de la thermodynamique, peut nous éclairer.

Ilya Prigogine (1917 – 2003), physicien et chimiste d'origine russe à l'origine de la révision du second principe de la thermodynamique (l'entropie), qui lui value le prix Nobel de Chimie en 1977, a démontré en 1968 que les organismes biologiques, ainsi que de nombreux systèmes du non-vivant, sont maintenus par le flux d'énergie qui les alimente. Ce flux étant sujet à des variations fréquentes, l'organisme maintient son équilibre (homéostasie<sup>t</sup>) grâce à un « feedback » permanent de l'environnement.

Mais Ilya Prigogine a également démontré que lorsque les variations sont trop importantes, l'organisme sur le point de rupture s'auto-réorganise de manière plus complexe, avec un flux plus important d'énergie le traversant. Ainsi, les capacités d'évolution émergent de systèmes dynamiques à entropie croissante.<sup>34</sup>

De manière corollaire, une augmentation linéaire d'énergie traversant un système complexe peut déclencher un changement non-linéaire de son état : un changement de phase.

Ce principe est à l'œuvre dans la floraison au printemps, où l'augmentation des heures d'ensoleillement associée à une hausse des températures provoque le bourgeonnement puis la floraison du monde végétal. Il est également craint par les climatologues concernant notre biosphère dans son ensemble, qui par un changement de phase de la glace en plus d'eau, de plus d'eau en plus de vapeur, et de plus de vapeur en plus d'effet de serre, pourrait créer une boucle de rétroaction positive aboutissant à la désertification complète de notre planète.

A l'échelle d'une ville, l'apport d'énergie semble pouvoir expliquer ces changements de phase, des simples bourgs de campagne du Xe siècle aux villes marchandes du XVe siècle, aux villes industrielles du XIXe siècle et aux mégalopoles postindustrielles d'aujourd'hui.

La première explosion des villes après l'an mille aurait ainsi pour origine les progrès dans les technologies agricoles du Moyen-âge, comme la charrue à versoir, qui aère le sol en profondeur et augmente l'oxygénation des grains, l'assolement triennal, qui permet de nourrir 5 personnes à partir d'un hectare au lieu d'une seule, l'irrigation, technique ramenée des croisades, les progrès de la métallurgie, qui rendent les outils plus efficaces et plus solides, l'introduction du joug frontal augmentant la force de traction des bœufs par rapport au précédent joug de garrot, puis du collier d'épaule, qui permet d'utiliser le cheval comme animal de trait, et enfin l'utilisation des déchets organiques...des villes, pour fertiliser les terres, en plus du fumier des troupeaux devenu si précieux qu'il était demandé en redevance par l'Abbé de Saint Denis,...

Toutes ces innovations eurent pour conséquence d'augmenter drastiquement les capacités humaines à exploiter plus efficacement l'énergie et à augmenter les flux d'énergie traversant leurs organisations sociales, créant une boucle de rétroaction positive facilitant l'émergence des villes. En effet, les innovations technologiques augmentèrent le rendement des terres agricoles, qui fournirent alors une énergie croissante aux villes sous forme de nourriture, permettant de soutenir des villes toujours plus grandes, dont les déchets vinrent augmenter à leur tour les rendements des terres agricoles.

Il en ira de même pour l'explosion de la ville industrielle du XIXe siècle, basée largement sur la conjonction du charbon comme source d'énergie primaire, du minerai de fer et de la métallurgie comme industrie de transformation, et du chemin de fer comme moyen de transport : le tout provoquant un afflux sans précédent d'énergie et provoquant un changement d'état, une réelle mutation, de l'organisme urbain.

Geoffrey West (1940), physicien britannique du Sante Fe Institute illustre cet aspect thermodynamique ainsi. "Un homme au repos fonctionne sur 90 watts. C'est la puissance dont vous avez besoin pour vous coucher. Si vous êtes chasseur-cueilleur en Amazonie, vous aurez besoin d'environ 250 watts pour courir et trouver votre nourriture. Quelle est la quantité d'énergie dont notre mode de vie américain a besoin ? Eh bien, quand on additionne nos calories et l'énergie nécessaire pour alimenter notre ordinateur et l'air conditionné, on constate qu'on a besoin de quelque 11 000 watts ! Quel type d'animal a besoin d'11 000 watts pour vivre ? Nous avons créé un style de vie où nous avons besoin

---

<sup>t</sup> La notion d'homéostasie a été définie pour la première fois par Claude Bernard en 1865, autour du concept de milieu intérieur et de son autorégulation malgré un milieu extérieur variant. Il a été repris par Walter Bradford Cannon (1871 – 1945), physiologiste américain dans son ouvrage « *The Wisdom of the Body* » (1932). L'homéostasie sera aussi à l'origine de l'homéostat de William Ross Ashby (1903 – 1972, psychiatre-ingénieur anglais considéré comme l'un des fondateurs de la cybernétique.

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

de plus de watts que la baleine bleue. Nous avons besoin de plus d'énergie que le plus gros animal qui n'ait jamais existé sur terre.<sup>35</sup>

## LA VILLE ASSEMBLAGE, SYMBIOSE DYNAMIQUE INSTABLE DE RELATIONS D'EXTERIORITE TERRITORIALISANTES

### LA THEORIE DES ASSEMBLAGES DE DELEUZE ET GUATTARI

La ville comme auto-organisation d'un système complexe aux propriétés émergentes trouve son cadre conceptuel à la fin des années 70 dans la philosophie de Gilles Deleuze (1925 – 1995) et Félix Guattari (1930 – 1992)<sup>36</sup>. Manuel DeLanda, philosophe mexicain basé à New York, Professeur Associé à la Graduate School of Architecture, Planning and Preservation de l'Université Columbia, s'appuie sur elle pour expliciter la ville comme un assemblage dynamique instable.<sup>37</sup>

Deleuze a explicité ce qu'est un assemblage dans Dialogues II : « C'est une multiplicité qui est constituée de composants et qui crée des liaisons, relations entre eux, à travers les âges, les sexes et les règnes – différentes natures. Ainsi la seule unité d'un assemblage est celle d'un co-fonctionnement : c'est une symbiose, une 'sympathie'. Ce ne sont jamais les filiations qui sont importantes, mais les alliances, alliages ; ce ne sont pas les successions, lignes de descendance, mais les contagions, les épidémies, le vent. »<sup>38</sup>

Corroborant la théorie de l'émergence des systèmes complexes, les assemblages de Deleuze et Guattari se forment à partir des relations d'extériorité entre les composants de l'assemblage et leur environnement, relations déclenchant des propriétés qui n'étaient alors que potentielles, nées de l'interaction entre composants, ou entre composants et environnement - et non les propriétés propres du composant pris isolément.

Ainsi les propriétés d'un assemblage ne peuvent pas être réduites aux propriétés de ses composants, comme le propose l'approche réductionniste classique cartésienne ou la dialectique de la totalité hégélienne<sup>4</sup>, car elles découlent de l'activation de propriétés potentielles, latentes, appelées « capacités », des composants dans leur interaction entre eux ou avec leur environnement.

Dès lors, un même composant peut contribuer à l'émergence de propriétés différentes en fonction des autres composants avec lesquels il interagit, ou de l'environnement dans lequel il est placé.

C'est pourquoi l'hétérogénéité des composants constitutifs d'un assemblage est une variable critique dans l'approche de Deleuze et Guattari, car elle permet, par la combinatoire plus importante des connexions, de faire apparaître des propriétés inédites au niveau de l'assemblage et d'augmenter les capacités d'adaptation de l'assemblage.

En effet, au sein de cette grande diversité de propriétés, certaines seront plus adaptées à l'environnement et se verront renforcées, conduisant ainsi à une plus grande faculté d'adaptation. Cette adaptation à son tour, renforcera certaines interactions et procurera ainsi un équilibre dynamique entre l'assemblage et son environnement.

Dès lors, les relations et interactions au sein d'un assemblage peuvent être considérées comme résultant d'une contingence obligatoire : le résultat de leur coévolution - et non d'une nécessité logique, l'impossibilité pour une « totalité » d'être autrement qu'elle n'est.

Deleuze et Guattari définissent plus précisément le concept d'assemblage sur deux dimensions.

Un premier axe définit le rôle que le composant d'un assemblage peut jouer : d'un rôle purement matériel (le « contenu » dans la terminologie de Deleuze et Guattari) à un rôle purement expressif (« l'expression »), ou d'un mix des deux.

Un deuxième axe définit deux processus dans lesquels ces composants sont impliqués, l'un renforçant et l'autre affaiblissant l'équilibre dynamique instable de l'assemblage : un processus de territorialisation et un processus de déterritorialisation.

Un même assemblage peut être constitué de composants territorialisant et d'autres composants déterritorialisant. Un même composant peut d'ailleurs jouer les deux rôles, à travers l'activation de capacités aux propriétés antagonistes.

Deleuze et Guattari distinguent par ailleurs un autre processus complémentaire de la territorialisation : le rôle de production et maintenance de l'identité par certains composants expressifs spécialisés que sont les gènes et le langage.

Les espèces chimiques ont toute une signature physique qui exprime leur identité, et qui est utilisé par exemple par les astrophysiciens pour connaître la composition de l'atmosphère d'une planète lointaine. Mais Deleuze argumente qu'à des moments clés de l'évolution, l'expression de l'identité physique est devenue fonctionnelle.

Ce premier moment est l'apparition du code génétique, permettant à l'information de ne plus être contenue directement dans la forme tridimensionnelle de l'atome ou de la molécule, mais dans une structure unidimensionnelle indépendante : une longue chaîne d'acide désoxyribonucléique.

---

<sup>4</sup> Dans la dialectique de la totalité du philosophe allemand Friedrich Hegel (1770 – 1831), tout système forme un tout à partir des relations d'intériorité entre ses composants et de leurs propriétés intrinsèques

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

Le second moment est celui de l'apparition du langage, marquant une rupture spatiale entre l'information et son objet préalablement toujours contigus : la vocalisation sonore du langage se détache de son objet matériel et gagne ainsi une plus grande autonomie.

Ces deux media expressifs sont à la base d'un deuxième processus synthétique, une seconde articulation complétant le processus de territorialisation en une « double articulation » : le codage, donnant lui-même lieu à son processus opposé : le décodage.

Ainsi, une simple conversation peut être plus ou moins codée : si elle s'appuie sur des règles de conduite rigides, on la dira très codée. Dans le cas contraire, elle sera décodée.

DeLanda se distingue de Deleuze sur un point assez fondamental cependant, la notion de méta-assemblage. Pour DeLanda en effet, les assemblages à un certain niveau peuvent eux-mêmes être les composants de macro-assemblages à un niveau supérieur, permettant ainsi d'approcher les phénomènes biologiques ou sociaux imbriqués, tels que la formation de marchés locaux, puis régionaux, puis provinciaux, puis nationaux, explicitée par Fernand Braudel.<sup>39</sup>

Au final, « L'identité de tout assemblage, à n'importe quelle échelle, est le produit d'un processus (territorialisation et parfois codage) et est toujours précaire, puisque d'autres processus (déterritorialisation / décodage) peuvent le déstabiliser » (DeLanda, Op Cit)

Trois derniers points sont cruciaux pour disposer d'une vision complète de la théorie des assemblages.

Tout d'abord, les assemblages émergent toujours de la récurrence d'interactions et processus au sein de *populations*. DeLanda exprime le même concept de la manière suivante : « les interactions entre les membres d'une collectivité peuvent amener à la formation d'articulations plus ou moins permanentes entre eux, générant un macro-assemblage disposant de propriétés et capacités propres. »

Ensuite, Deleuze introduit la notion de *diagramme*, comme étant l'espace des possibilités d'évolution des assemblages, caractérisé par ses degrés de liberté et par un ensemble d'invariants topologiques. DeLanda illustre cette dernière proposition assez abstraite par un exemple concret : le phylum chordata, auquel appartiennent les vertébrés, peut être considéré comme un plan abstrait commun à tous les vertébrés, spécifiant non pas des dimensions précises (de membres, organes, os,...), puisqu'il existe près de 100.000 vertébrés très différents, mais spécifiant plutôt des invariants topologiques, tels que la connectivité générale des différentes parties du corps. Ainsi, le diagramme Phylum définit un espace de possibilités, celui de tous les corps de vertébrés, et a une structure topologique, et non métrique, basée sur des invariants, que DeLanda appelle *singularités universelles*.

Cette notion d'espace de possibilités, bien qu'assez abstraite, est employée couramment en physique-chimie sous le nom d'*espace des phases*, défini comme étant un espace où tous les états possibles d'un système sont représentés. Ces états sont déterminés par des invariants du système, les singularités universelles appelées *attracteurs* en physique ou chimie, et sont définis sur des axes correspondant chacun à un *degré de liberté* – ou paramètre – du système. Tout état possible du système est donc représenté par un point dans cet espace multidimensionnel, et le diagramme de phase représente tous les états (la succession des points) que peut prendre le système.

Enfin, DeLanda explicite les notions de causalité non-linéaire et de causalité statistique.

La causalité linéaire définit par exemple l'augmentation progressive de la température de l'eau lorsqu'on apporte de l'énergie. La causalité non-linéaire explique le passage de l'état de l'eau à celui de gaz lorsqu'on franchit un seuil (100°C). Ainsi, un événement extérieur de grande intensité sur un système peut produire un effet très faible sur ledit système, voire pas d'effet du tout, et réciproquement, un événement extérieur très faible en intensité (le passage de l'eau de 99°C à 100°C) peut produire un changement d'état majeur du système, car franchissant un seuil.

La causalité statistique s'applique au sein de larges populations. Prenons l'exemple du cancer pour l'expliciter : un certain nombre de facteurs peuvent augmenter les risques du cancer. Néanmoins, au sein de la population française par exemple, certaines personnes exposées à ces facteurs de risque ne développeront pas de cancer, peut-être parce qu'elles auront été exposées à d'autres facteurs réduisant les risques du cancer, comme l'activité physique. En d'autres termes, aucune série d'événement n'intervient de manière totalement isolée d'autres séries d'événements, qui tous peuvent interférer entre eux. Dès lors, la seule approche causale au sein de populations ne peut être que probabiliste. DeLanda en déduit que les larges assemblages sociaux (villes, territoires, pays,...) peuvent être considérés comme la conséquence collective non-intentionnelle d'une multitude d'actions individuelles intentionnelles, résultant en une distribution statistique de propriétés.

Essayons de résumer la théorie des assemblages de Deleuze, Guattari et DeLanda avant de voir comment elle s'applique à la ville et au territoire :

Les assemblages sont constitués de composants auto-subsistants, articulés entre eux par des relations d'extériorité, de sorte que tout composant peut être détaché d'un assemblage et intégré à un autre, activant alors des capacités parfois différentes donnant lieu à de nouvelles propriétés. Les assemblages sont définis sur deux dimensions, d'un côté les

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

rôles matériels et/ou expressifs des composants, et de l'autre les processus de territorialisation (stabilisants) ou déterritorialisation (déstabilisants) dans lesquels ils sont impliqués. Une troisième dimension<sup>v</sup> est celle des processus de codage et décodage assurés par les gènes ou le langage, consolidant ou assouplissant l'identité de l'assemblage. Tous ces processus sont récurrents, au sein de populations de composants, et y font émerger des assemblages, qui eux-mêmes peuvent devenir des composants d'assemblages à une échelle supérieure. Tous les états possibles que peuvent prendre un assemblage sont déterminés par ses degrés de liberté et des attracteurs, et peuvent être visualisés sur un diagramme de phase. Des seuils peuvent entraîner des changements de phase du système, c'est-à-dire une recomposition des relations entre composants au sein d'un nouvel état d'équilibre précaire. Enfin, les propriétés de larges assemblages sociaux résultent d'une distribution statistique des effets de la multitude d'actions individuelles et de leur interférence.

## L'APPLICATION DE LA THEORIE DES ASSEMBLAGES A L'ARCHITECTURE, A LA VILLE ET AU TERRITOIRE

La théorie des assemblages de Deleuze et Guattari, complétée par la notion d'articulation multi-échelles des assemblages de DeLanda, offre une grille de lecture particulièrement bien adaptée à l'analyse de la dynamique urbaine.

DeLanda l'illustre abondamment dans « A New Philosophy of Society » (Op Cit), en partant de l'échelle du bâtiment et en allant jusqu'à l'échelle d'un pays<sup>40</sup> :

Un bâtiment peut être considéré comme un assemblage constitué de composants jouant à la fois des rôles matériels et des rôles expressifs. Ainsi, la structure porteuse d'un bâtiment joue un rôle matériel clé tandis que la façade va souvent avoir un rôle expressif. Mais si la façade est porteuse, elle aura un double rôle matériel et expressif.

Cette structure porteuse elle-même peut être considérée comme un assemblage, dans certains cas, de poteaux et poutres, mais dans d'autres cas, en particulier à partir d'une certaine hauteur de bâtiment, exiger une structure totalement différente, comme par exemple un noyau en béton et un treillis métallique pour certains gratte-ciels – la technique poteau-poutre, ou dans d'autres cas le type de matériau utilisé (bois, terre,...), arrivant à un seuil nécessitant un changement d'état de l'assemblage « structure porteuse ».

D'autres composants importants déterminent la connectivité d'un bâtiment. L'arrivée de l'ascenseur illustre bien l'ajout d'un nouveau degré de liberté aux bâtiments à travers une nouvelle connectivité verticale. Cette connectivité verticale va à la fois inverser la stratification sociale des immeubles de *logement*, faisant « grimper » l'appartement « noble » du 1<sup>er</sup> au dernier étage (modification du rôle expressif des appartements du 1<sup>er</sup> étage et du dernier étage), mais va également modifier drastiquement la *population* des immeubles de *bureau*, en permettant aux entreprises de rassembler leurs employés au sein de tours, qui assurent une proximité temporelle plus importante, et donc une communication interpersonnelle plus rapide entre employés, via les circulations verticales que via les circulations horizontales antérieures d'un immeuble à un autre (apparition d'un nouvel état par modification d'un degré de liberté du système).

Les processus territorialisant d'un bâtiment sont par exemple les traditions constructives, techniques vernaculaires, qui, parfois pendant des siècles, ont déterminé les différentes formes que pouvait prendre un bâtiment. L'arrivée de la mode et l'accélération des tendances dès le XVIII<sup>e</sup> est, à l'opposé, un processus déterritorialisant pour le bâtiment, spécialement pour les espaces intérieurs, mais également pour l'image extérieure des constructions. Concernant les bâtiments de bureaux, l'évolution de l'organisation des entreprises et des techniques de management d'un mode hiérarchique vertical et administratif à un mode participatif horizontal peut aussi être considérée comme un processus déterritorialisant, ayant mené l'agencement interne des bureaux du cloisonnement à l'open space.

Les bâtiments forment eux-mêmes des assemblages au niveau de quartiers, de zones commerciales, résidentielles ou administratives. A ce niveau, la connectivité matérielle au sens premier est assurée par un certain nombre de composants comme l'infrastructure sous-terrainne des réseaux d'eau, d'assainissement, de chauffage, d'électricité ou de téléphonie. La connectivité des individus, permettant l'interaction des parcours de voisinage, est quant à elle assurée par les places, squares, églises, pubs, boutiques, rues et trottoirs, qui tous ont un rôle matériel évident, mais également un rôle expressif de plus en plus prégnant dans la communication des villes.

Les processus territorialisant un quartier ont été déjà abordé plus haut : il s'agit des processus d'agrégation et de ségrégation mises à jour par Thomas Schelling, Paul Krugman et James Vance. On peut y ajouter l'action territorialisante des plans d'urbanisme des autorités locales, et spécialement les politiques de zoning de l'après-guerre. La mobilité géographique et le coût du foncier peuvent être à l'opposé considérés comme des processus de déterritorialisation. Ainsi au XIX<sup>e</sup> siècle, les ouvriers vivaient dans des quartiers dont le cœur était l'usine et l'étendu suffisamment limitée pour pouvoir s'y rendre à pieds. Les limites du quartier ouvrier étaient nettes. L'arrivée du vélo puis du tramway à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle permit à la classe ouvrière de s'éloigner et de s'installer dans des banlieues ouvrières aux frontières moins nettes.<sup>41</sup> Le prix du foncier, avec la montée en force de la spéculation immobilière, est un facteur déterritorialisant extrêmement puissant, modifiant la répartition des populations de citoyens, d'entreprises

---

<sup>v</sup> DeLanda crée une troisième dimension de ce que Deleuze et Guattari nomment la double articulation de la territorialisation



# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

et de commerces sur un territoire en fonction de leur capacité financière. Des sociologues urbains, en particulier de l'École de Chicago, ont très tôt conçu des modèles de développement urbain tenant compte de ce facteur économique, à l'instar de Robert E. Park (1864 – 1944) ou d'Ernest W. Burgess (1886 – 1966) et de son modèle d'urbanisation concentrique (Concentric Zone Model) où le centre est occupé par le quartier d'affaires, une zone transitoire est occupée par l'industrie, puis une zone résidentielle ouvrière de logements collectifs, puis une zone résidentielle bourgeoise de villas. Un modèle adapté aux villes américaines mais assez peu aux villes européennes, spécialement dans le Sud de l'Europe, où le centre ville reste souvent le quartier le plus prisé.

Au niveau d'une ville, les composants peuvent être par exemple son centre, qui joue souvent un rôle matériel important en termes de connectivité, ainsi qu'un rôle expressif quasi identitaire pour la cité, ainsi que les assemblages formés par les différents quartiers ayant chacun des fonctions (matérielles) et identités (expressives) plus ou moins nettes, ou encore les réseaux de transport, qui vont déterminer fortement la répartition des autres composants. Mais une ville est un assemblage dont les composants s'étendent souvent bien au-delà de ses frontières officielles, car l'équilibre dynamique de cet assemblage a besoin des ressources naturelles environnantes (rivières, forêts, terres cultivables,...). Ainsi une cité médiévale de 3.000 habitants avait besoin des terres d'environ 10 villages alentours pour générer suffisamment de nourriture pour ses habitants. Une ville s'inscrit donc elle-même dans un réseau de villes et villages voisins qui peuvent former un assemblage dont elle est la partie émergée.

Les privilèges accordés aux citoyens de certaines villes ainsi que les remparts qui les entouraient étaient au Moyen-âge des processus territorialisant. Le mouvement de périurbanisation apparu aux Etats-Unis après la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale, qui aboutit à un modèle urbain polycentrique au sein de larges agglomérations urbaines, fût par contre pour les villes historiques un processus puissamment déterritorialisant.

Au niveau d'un territoire, les relations et interactions répétées entre des villes peuvent mener à l'émergence d'assemblages territoriaux dotés de propriétés propres. Ainsi, entre l'an 1000 et 1300, les cités de zones féodales de faible densité (France, Espagne, Angleterre) restèrent en relative autarcie, contrairement à leurs alter-égos de zones plus denses (Italie du nord, Flandres, Pays-Bas) où le commerce était plus intense, et couvrait des zones beaucoup plus étendues, ce qui conduisit à des échanges beaucoup plus fréquents entre ces cités, créant les conditions d'émergence d'assemblages plus larges de réseaux de villes.

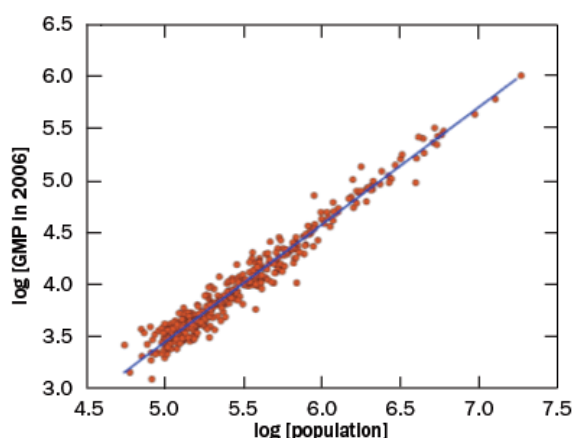
Cette dissymétrie entre territoires peut à son tour créer une boucle de rétroaction positive, attirant capitaux, savoir-faire, main d'œuvre, et autres richesses, et favorisant l'émergence et la diffusion plus rapide de nouvelles idées, connaissances et techniques, comme ce fût le cas dans le Nord de l'Italie d'où partit la Renaissance.

Cette approche imbriquée de l'auto-organisation d'assemblages sociaux à différentes échelles, du bâtiment aux territoires, en fonction des capacités activées des composants en propriétés émergentes au niveau de chaque assemblage, ainsi que des processus itératifs de territorialisation/déterritorialisation, offre un cadre explicatif particulièrement intéressant, notamment pour pouvoir modéliser la ville.

## LE CODE GENETIQUE DES VILLES REVELE

En croisant les lois d'échelles de Kleiber, qui veulent qu'en biologie le rapport masse/métabolisme d'un organisme peut être mis en équation, et des masses considérables de données statistiques sur interactions humaines en ville, le professeur Geoffrey West, aidé de Luis Bettencourt, ont découvert que la plupart des variables urbaines pouvaient être décrites par quelques équations.<sup>42</sup>

Ainsi, note Hubert Guillaud, responsable de la veille de la FING, qui relate cette découverte dans Internet ACTU : « à chaque doublement de population, les habitants sont en moyenne 15 % plus riches, 15 % plus productifs, 15 % plus innovants et ont 15 % de "chance supplémentaire" d'être victimes de crimes, et ce, quelle que soit la ville, son histoire, sa géographie. Fait remarquable, cette règle des 15 % semble s'appliquer à d'autres phénomènes urbains comme la vitesse moyenne des déplacements, la vitesse de propagation des maladies, le nombre d'établissements d'enseignement... »<sup>42</sup>



*Loi de puissance mise à jour à travers la comparaison de 300 villes américaines en fonction de leur population rapportée au produit métropolitain brut – Geoffrey West – Sante Fe Institute*

Les effets non-linéaires d'agglomération pourraient ainsi être expliqués par une loi de puissance super-linéaire, permettant de prédire les besoins d'une ville.

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

En se développant, l'organisme ville deviendrait ainsi toujours plus efficace en termes de richesse, de productivité et d'innovation, mais également sans cesse plus nocif en termes de crimes, maladies, embouteillages, et autres effets dérivés de cette croissance.

Ces résultats confirment les différentes théories historiques, économiques et sociales sur l'efficacité de la ville pour la croissance économique, l'innovation et la créativité – ainsi que pour l'ensemble des effets désastreux pour notre santé et la biosphère vus en introduction.

Mais ils confirment qu'il y aurait effectivement un génotype urbain commun à toutes les villes du globe, et qui s'exprimerait par un phénotype différent en fonction de l'environnement dans lequel elles évoluent, permettant d'envisager une modélisation évolutionniste de l'organisme urbain.

Mais West nous mets également en garde "La seule chose qui arrête les équations superlinéaires, c'est quand nous manquons de quelque chose dont nous avons besoin".<sup>42</sup>

Les différentes approches d'auto-organisation et d'émergence vues ci-dessus, qu'elles soient prises sous l'angle sociale, cybernétique, informationnel, thermodynamique ou philosophique, démontrent tout l'intérêt de la théorie des systèmes complexes et de l'évolution pour comprendre la ville. La découverte de Geoffrey West et de Luis Bettencourt démontrent de plus que l'organisme ville dispose d'un code génétique s'exprimant sous différents phénotypes en fonction de l'environnement, et qu'il serait ainsi possible de modéliser, voire de prédire leur évolution – domaine que nous allons investiguer dans le chapitre suivante.

## III. LA MODELISATION EVOLUTIONNISTE DE LA COMPLEXITE URBAINE

### LES ALGORITHMES EVOLUTIONNISTES, OU COMMENT UN ELEVAGE DE MINI-PROGRAMMES INFORMATIQUES PEUT BATTRE UN MEGA-PROGRAMME CLASSIQUE

Le champ de recherche des systèmes complexes, décliné dans les différents domaines de la physique, la chimie, la biologie, la génétique, ou encore les sciences sociales, l'économie, la politique ou l'urbanisme, a bénéficié ces cinquante dernières années de la montée en puissance d'un sous-domaine de l'intelligence artificielle reposant exactement sur les mêmes principes d'auto-organisation et d'émergence mais appliqués cette fois au code informatique : **les algorithmes évolutionnistes** – comme si la modélisation d'un système complexe, ne pouvait se faire que via un autre système complexe et non dans une approche analytique et réductionniste.

### DE LA LOGIQUE DESCENDANTE UNIFIEE A LA LOGIQUE ASCENDANTE DISTRIBUEE, LE CHANGEMENT DE PARADIGME D'OLIVER SELFRIDGE

Alan Turing, Claude Shannon et Norbert Wiener, l'auteur de *Cybernetics* (1949), l'ouvrage fondateur de la cybernétique, discutaient dès les années 40 aux Laboratoires Bells d'un cerveau électronique capable d'apprentissage, faculté que l'on nommera par la suite *Intelligence Artificielle*.

Mais c'est un jeune homme surdoué, Oliver Selfridge (1926 – 2008), doctorant au MIT à l'âge de 18 ans sous la direction de Norbert Wiener, qui jeta les premières bases théoriques de l'Intelligence Artificielle lors d'une conférence au National Physical Laboratory en 1958. Le titre de sa présentation était « Pandémonium : A Paradigm for Learning »<sup>43</sup> - Pandémonium faisant référence à la capitale imaginaire des enfers où Satan invoque le conseil des démons, dans le poème épique intitulé *Paradis Perdu* de John Milton (1608 – 1674), un des plus grands poètes anglais.<sup>44</sup>

L'objectif de Selfridge était de trouver comment apprendre à un ordinateur – aux capacités encore très limitées à l'époque – à reconnaître des formes ou phénomènes mal définis ou erratiques, tels que le langage et la voix. Plutôt que de concevoir un unique programme informatique anticipant tous les cas de figure, comme cela aurait été la solution normale pour un informaticien de l'époque, l'approche totalement nouvelle de Selfridge consista plutôt à développer un essaim de mini-programmes simples, qu'il appela « démons », dans une logique ascendante et distribuée, un peu à la manière des fourmis d'Edward O. Wilson (1956) - et non dans une logique descendante et unifiée.

Ainsi, pour reconnaître les 26 lettres de l'alphabet par exemple, une myriade de mini-programmes chargés chacun de reconnaître des parties de lettres simples - telles que des lignes parallèles ou perpendiculaires, des cercles, des points, ... - reportent à 26 programmes de rang supérieur, chargés eux de reconnaître chacun une lettre en votant avec un certain degré de confiance. A chaque lettre présentée aux « démons », un démon de rang encore supérieur récolte les votes des 26 démons et choisit celui qui a le degré de confiance le plus élevé, puis le processus passe à la lettre suivante.

Aucune règle préalable n'est stipulée concernant par exemple l'association d'un trait vertical et d'un cercle pour former un « b ». Par contre, un système de boucles de rétroaction positives sont mises en place entre chaque niveau hiérarchique de démons, jusqu'aux démons de rang les plus élevés présentant le résultat de la déduction collective à l'auteur des mots. Lorsqu'une lettre ou un mot est validé, les boucles de rétroaction renforcent à posteriori les connexions entre les démons qui avaient trouvé la bonne lettre ou le bon mot, et à contrario diminuent voire dissocient les connexions entre les démons s'étant trompés - permettant ainsi d'augmenter le degré de confiance, le poids, des démons les plus aptes à reconnaître une lettre lors de la prochaine rencontre de celle-ci.

Oliver Selfridge a très vite fait le parallèle entre son processus d'apprentissage et celui de la sélection naturelle : « le programme est vraiment une sélection naturelle des démons en développement : s'ils remplissent une fonction utile, alors ils survivent et sont peut-être eux-mêmes à la source d'autres démons jugés sur leur mérite. Il est parfaitement raisonnable d'envisager ce dispositif à plus grande échelle...à la place d'un Pandémonium nous pourrions en avoir une foule, tous construits de manière sensiblement similaire, et utiliser la sélection naturelle sur cette multitude. »<sup>45</sup>

### L'EMERGENCE DE FORMES AUTO-ORGANISEES ET D'UNE INTELLIGENCE DES ESSAIMS

#### LES AUTOMATES CELLULAIRES DE VON NEUMANN

A la même époque, John von Neumann (1903 – 1957), l'un des plus grands mathématiciens de l'histoire moderne, inventa l'automate cellulaire. Von Neumann travaillait dans les années 60 au Laboratoire National de Los Alamos sur les systèmes auto-répliatifs, notamment en vue de concevoir des machines pouvant se répliquer sur la lune ou sur mars dans le cadre de la conquête spatiale. Sur les conseils de son collègue Stanislaw Ulam (1909 – 1984), mathématicien polonais non moins génial qui étudiait alors la croissance des cristaux à partir d'un modèle simple de réseau, von Neumann conçut un modèle mathématique abstrait basé sur une grille à deux dimensions où chaque cellule pouvait

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

prendre 29 états, et démontra la capacité d'un motif particulier à s'auto-répliquer.<sup>46</sup> La première démonstration logique était donnée, ouvrant la voie à un nombre croissant d'autres automates cellulaires.

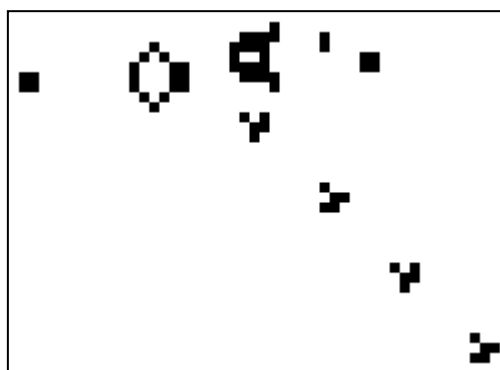
## LE JEU DE LA VIE DE CONWAY

Le plus connu d'entre eux est « Le jeu de la vie »<sup>47</sup> conçu en 1970 à l'Université de Cambridge au Royaume-Uni par John Conway (1937), mathématicien britannique spécialiste de la théorie des jeux. S'inspirant des systèmes auto-réplicatifs de von Neumann, le jeu de la vie de Conway génère des motifs extrêmement complexes à partir de règles de base très simples, selon des principes en fait tout à fait similaires aux grilles de Barricelli (voir plus loin : « la sélection naturelle appliquée à l'informatique »). Disposées sur une grille à deux dimensions théoriquement infinie, des cellules peuvent prendre deux états, morte ou vivante, en fonction de l'état de leurs huit voisines :

- Une cellule morte possédant exactement trois voisines vivantes devient vivante.
- Une cellule vivante possédant deux ou trois voisines vivantes le reste, sinon elle meurt.

Différentes structures peuvent alors apparaître dans l'espace : des structures stables qui restent stationnaires tant qu'aucun élément perturbateur n'apparaît dans le voisinage, des structures périodiques, également appelées oscillateurs, qui revêtent plusieurs formes de manière cyclique avant de retrouver leur forme initiale, des vaisseaux ou navires, capables après un certain nombre de générations de produire une copie d'eux-mêmes, des puffers qui se déplacent en laissant une trainée de débris derrière eux, ou encore les fameux canons produisant des vaisseaux à un rythme variable.

Conway avait promis une récompense à qui prouverait l'existence de motifs croissant indéfiniment, et en 1980, Bill Gosper (1943), mathématicien et informaticien américain considéré comme l'un des fondateurs de la communauté des hackers, conçut le fameux canon à planeurs (figure ci-contre). Gosper conçut par ailleurs un algorithme, HashLife, permettant d'améliorer grandement la vitesse de calcul des motifs du jeu de la vie.



L'augmentation de la puissance de calcul a permis par la suite d'explorer un nombre croissant de configurations du jeu de la vie, notamment par Stephen Wolfram (1959), scientifique britannique qui dès l'âge de 16 ans écrivait son premier article sur la physique des particules. Wolfram ira même, dans *A New Kind of Science* (2002)<sup>48</sup>, jusqu'à considérer la simulation de systèmes complexes à partir de l'auto-organisation d'agents simples comme une nouvelle science, l'univers étant, selon lui, digital par nature, et fonctionnant à partir de lois fondamentales qui peuvent être décrites comme des mini-programmes informatiques simples.

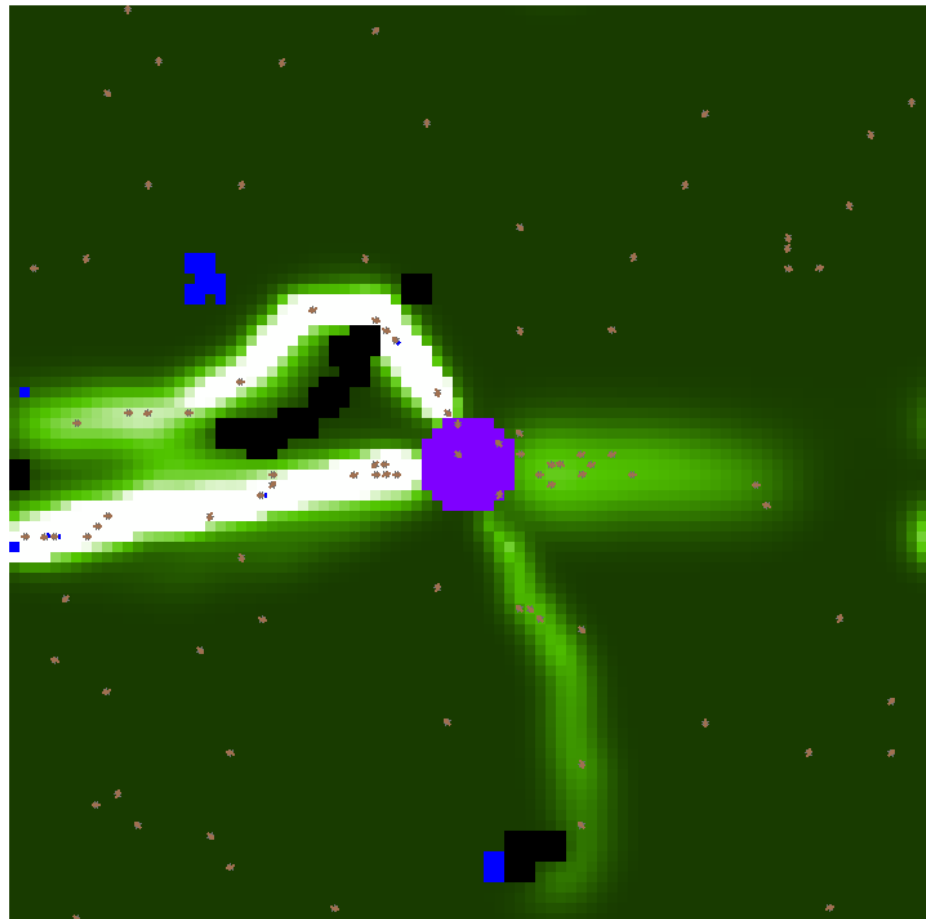
## LES SIMULATIONS D'ESSAIS DE MITCH RESNICK SUR STARLOGO

Trente ans après les travaux d'Evelyn Fox Keller (1936) et de Lee Segel (1932 – 2005)<sup>49</sup> sur les myxomycètes (slime mold *dictyostelium discoideum*) dans les années 60 au MIT (voir plus haut ...), Mitchel Resnick, aujourd'hui Directeur du Lifelong Kindergarten group au Media Lab et directeur du programme éducatif Media Arts and Science, a développé un programme permettant de simuler le comportement d'agrégation / séparation des myxomycètes en fonction du nombre de cellules et du niveau d'AMP. Ce programme, nommé par la suite *StarLogo*<sup>w</sup>, est devenu une référence dans la simulation de comportements émergents au sein de colonies d'individus, qu'il nomme les tortues, interagissant selon des règles simples. Conçu pour pouvoir être utilisé par des enfants, il exploite un jeu de commandes simples et affiche graphiquement les simulations à l'écran, d'une manière très similaire à un jeu vidéo. Il permet aujourd'hui de simuler le comportement d'abeilles, lucioles, termites, lapins, oiseaux, fourmis (voir copie d'écran page suivante)<sup>x</sup>, mais également la formation d'embouteillages ou encore la création de jeux d'arcade. Son grand intérêt est de pouvoir directement visualiser l'émergence de comportements au niveau de l'essaim en intervenant uniquement sur un certain nombre de paramètres individuels et d'environnement : une version des automates cellulaires de Barricelli et von Neumann pour la génération vidéo.

<sup>w</sup> <http://education.mit.edu/starlogo/>

<sup>x</sup> La simulation de recherche de nourritures par les fourmis est décrite dans Resnick M. (2000) *Turtles, termites and traffic jams*. MIT Press, ainsi que dans Bonabeau E., Dorigo M. and Theraulaz G. (1999) *Swarm intelligence. From natural to artificial systems*. Santa Fee Institute studies in the sciences of complexity. Oxford University Press

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

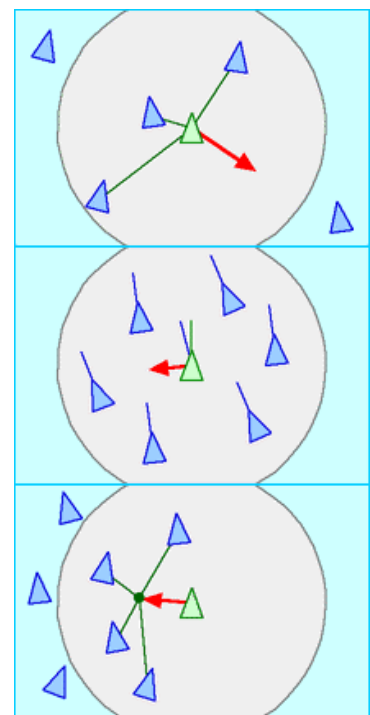


*Simulation de la recherche de nourriture par les fourmis sur StarLogo, programmée par Mitchel Resnick. Six paramètres permettent de générer des comportements émergents plus ou moins efficaces et ainsi d'interagir directement avec le phénomène même d'émergence.*

## LES BOIDS DE CRAIG REYNOLDS

Craig Reynolds (1953), expert en vie artificielle et infographie, a créé en 1986 la simulation de vie artificielle Boids, simulant le comportement d'une nuée d'oiseaux en vol. Il définit sa recherche ainsi : "Le mouvement agrégé d'un vol d'oiseaux, un troupeau d'animaux, ou un banc de poisson est une expérience magnifique et familière du monde naturel. Mais ce type de mouvement complexe est rarement rencontré dans l'animation en informatique. J'explore une approche basée sur la simulation en tant qu'alternative au scripting des trajets de chaque oiseau pris individuellement. L'essaim simulé est l'élaboration d'un système de particules, où les oiseaux sont les particules. Le mouvement agrégé de l'essaim simulé est créé à l'aide d'un modèle comportemental distribué, très similaire à celui à l'œuvre dans un essaim naturel, où chaque oiseau choisit son propre chemin. Chaque oiseau simulé est implémenté comme un acteur indépendant qui navigue en fonction de sa perception local de son environnement dynamique, les lois simulées de la physique qui dirigent ses mouvements, ainsi qu'un ensemble de comportements programmés dans un moteur appelé « animator ». Le mouvement agrégé de l'essaim simulé est le résultat de l'interaction dense de comportements relativement simples des oiseaux individuels simulés. »<sup>50</sup>

Ainsi, les boids sont des membres actifs d'un troupeau ou essaim, calculant en temps réel leurs positions par rapport aux autres membres. Chaque Boid calcule un nombre de règles simples : ne t'approche pas trop de tes voisins (séparation), adapte ta vitesse à celle de ton voisin le plus proche et essaie de suivre le même chemin (alignement), essaie de te rapprocher du centre du troupeau (cohésion). Aucune règle ne dit : « forme un troupeau ». Les règles sont uniquement locales, s'appliquant à ce qu'un Boid peut voir et faire dans son proche voisinage. Et pourtant l'essaim est reconnaissable comme un ensemble complexe.



*Règles de fonctionnement des Boids de Craig Reynolds, dans l'ordre : séparation, alignement, cohésion. Extrait de « Boids, background and updates » - <http://www.red3d.com/cwr/boids/>*



# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

Les boïds sont souvent utilisés dans des jeux vidéos ou des films (Batman Returns, The Lion King,...), car ils fournissent des représentations réalistes de nuées d'oiseaux, bancs de poissons, essaims d'insectes ou autres troupes d'animaux

Les automates cellulaires de von Neumann, le jeu de la vie de Conway, les tortues de Resnick et les Boïds de Reynolds, ainsi que de nombreux autres travaux de chercheurs au croisement de l'informatique, de la neuropsychologie, des sciences cognitives ou de la physique, tels que Marvin Minsky (1927), Seymour Papert (1928), Franck Rosenblatt (1928 – 1971), Warren McCulloch (1898 – 1969), John Hopfield (1933), ou encore Donald Hebb (1904 – 1985) ont posé les bases de ce qui allait devenir une lame de fond dans le domaine de l'informatique : les systèmes de modélisation multi-agents (SMA)<sup>y</sup> et à une application phare, l'intelligence des essaims (Swarm Intelligence, SI)

Les SMA ont pour objectif de simuler les actions et interactions d'agents autonomes, qu'ils s'agissent de fourmis, d'individus ou d'organisations telles qu'entreprises, villes, territoires,..., selon des règles comportementales simples, afin d'évaluer leurs actions sur le système étudié dans son ensemble, en particulier l'émergence de propriétés et comportements complexes au niveau macro.

Ils s'appliquent aujourd'hui par exemple à l'optimisation du trafic sur Internet (Ant-Based Routing) ou du trafic aérien<sup>51</sup> à l'aide de la méthode ACO (Ant Colony Optimization), à la simulation de mouvements de foule, ou encore à l'optimisation du tracé des lignes de métro à Tokyo.

## LA SELECTION NATURELLE APPLIQUEE A L'INFORMATIQUE

### LES SYMBIO-ORGANISMES DE BARRICELLI

Le mathématicien italo-norvégien Nils Aall Barricelli (1912 – 1993) faisait ses premières simulations sur ordinateur de symbiogenèse et d'évolution, inspirées de la théorie de la symbiogenèse de Merezhkovsky et Kozo-Polyansky, au Laboratoire d'étude avancée (Institute for Advanced Study) de Princeton, New Jersey, l'un des plus prestigieux laboratoires au monde fondé en 1930 pour stimuler la recherche pure au plus haut niveau.<sup>52</sup>

Bien que sa première publication en la matière<sup>53</sup>, publiée en italien, n'ait pas été très remarquée, ses expériences sont reconnues aujourd'hui comme les premières tentatives de simulation informatique de l'évolution, relayées plus largement dans une traduction anglaise ainsi que d'autres publications ultérieures.<sup>54 55</sup>

Ses recherches consistaient essentiellement à placer des nombres sur une grille, et à les déplacer en fonction de règles d'interaction locale, à la manière des automates cellulaires de von Neumann, qu'il précède de quelques années :

- les nombres positifs étaient déplacés d'un nombre  $n$  de cases vers la droite, tandis que les nombres négatifs étaient déplacés vers la gauche, à moins de rentrer en collision avec d'autres nombres.
- Les mêmes nombres pouvaient se « reproduire » sur  $m$  cases vers la droite ou la gauche, sauf en cas de collision
- La reproduction pouvait avoir lieu plusieurs fois sous certaines conditions et à l'exception de collisions.
- Si deux nombres entraient en collision dans une case, alors s'ils étaient égaux, seul un nombre était préservé, et sinon, d'autres règles s'appliquaient pour sélectionner quel nombre était placé dans la case ou dans une autre case.

La figure ci-contre, extraite de la publication de 1957 de Barricelli, montre la propagation de haut en bas des nombres -3, 1, 5, trouvés aléatoirement : dès la quatrième génération, la série (5, -3, 1, -3, 0, -3, 1) apparaît et se stabilise.

Barricelli nomma ces formes émergentes des organismes. Ces organismes étaient considérés comme indépendants s'ils pouvaient se reproduire sans l'apport d'organismes de série différente, eux-mêmes considérés « d'une autre espèce ». Au contraire, lorsqu'un organisme était incapable de se reproduire sans l'apport constant d'autres nombres, il était considéré comme dépendant et nommé « parasite ».



Barricelli étendit la théorie de symbiogenèse cellulaire de Merezhkovsky et Kozo-Polyansky à une théorie plus générale de « **symbio-organismes** » définis comme « des structures autoreproductibles construites par association symbiotique d'entités autoreproductibles de toute sorte », et nota la forte similarité entre ses expériences informatiques et les faits biologiques : « La distinction entre une expérience évolutionniste réalisés par des nombres dans un ordinateur et par des nucléotides dans un laboratoire de chimie est assez subtile ».<sup>56</sup>

<sup>y</sup> *Systems multi-agents (SMA), également appelé agent-based model, acronyme : ABM*

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

JOHN HOLLAND ET ALEX FRASER, INVENTEURS DE L'ALGORITHME GENETIQUE ET DE LA PROGRAMMATION GENETIQUE (60's – 70's)

John Holland (1929), scientifique américain professeur de psychologie et d'informatique, et également ancien élève de Norbert Wiener, menait également à la fin des années 60 des recherches sur les automates cellulaires avec ses étudiants de l'Université du Michigan. Il s'appuya sur le modèle Pandémonium de Selfridge auquel il ajouta la logique de la théorie de l'évolution de Darwin pour créer ce qu'il appela l'algorithme génétique. L'approche de Holland consistait à construire un pool génique de différents logiciels possibles et de laisser les programmes les plus fructueux évoluer et émerger.

En biologie évolutive, la sélection naturelle d'organismes à base d'ADN consiste également à créer un groupe très important de variations génétiques (les génotypes), puis d'évaluer le taux de succès des comportements générés par tous ces différents gènes (les phénotypes). Les comportements les plus fructueux sont transmis à la génération suivante, via la reproduction sexuelle, et les moins fructueux disparaissent. Le critère d'évaluation de la nature est la durée de vie : si l'organisme survit assez longtemps dans l'environnement pour arriver à l'âge de reproduction, c'est qu'il est adapté à cet environnement. Ainsi la sélection naturelle tend à produire des individus les plus adaptés à leur environnement.

Pour Holland, le parallèle était évident : le génotype était le code du logiciel et le phénotype ce que ce code faisait concrètement. Le critère d'évaluation de Holland était par contre plus spécifique : le logiciel parvenant le mieux à résoudre une tâche, que ce soit une simple addition ou reconnaître une forme dans une image, serait admis à passer à la génération suivante.

Corroborant l'approche génétique de l'informatique de Holland, le généticien anglais Alex Fraser (1923 – 2002) apporta dès 1957 une contribution majeure dans le développement de la modélisation de systèmes génétiques, notamment au sein de l'Université de Sydney sur l'ordinateur SILLIAC, cousin du ILLIAC de l'université d'Illinois, ainsi qu'au sein du Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) de Sydney en Australie. Alors que les travaux de Fraser<sup>57</sup>, très proches de ceux de Holland, contenaient déjà tous les éléments essentiels des algorithmes génétiques actuels, ils furent hélas confinés pendant vingt ans au seul domaine de la génétique.<sup>58</sup>

Holland et Fraser développèrent leurs idées dans les années 60 et 70, à une époque où la puissance de calcul disponible était très loin de pouvoir générer les milliers de générations de codes nécessaires à l'optimisation d'un logiciel à base d'algorithmes génétiques. Il fallut attendre les années 80 pour pouvoir mettre en œuvre les idées de Holland, et l'un des tous premiers systèmes à base d'algorithmes génétiques, le Tracker de David Jefferson et Chuck Taylor, fonctionnant sur la Connection Machine de Danny Hillis, inventeur des superordinateurs massivement parallèles, consistait...à simuler le comportement des fourmis.

L'ELEVAGE DE FOURMIS PISTEUSES DE DAVID JEFFERSON ET CHUCK TAYLOR (1985)

David Jefferson et Chuck Taylor, deux professeurs de UCLA, développèrent en effet au milieu des années 80 un programme, *Tracker*, dont l'objectif était d'identifier une piste entre deux points en s'inspirant de l'ouvrage de Edward O. Wilson sur le comportement des fourmis.

Ils déterminèrent un damier sur lequel ils tracèrent une piste sinueuse de 82 cases, puis conçurent 16.000 fourmis virtuelles, une pour chaque processeur de la *Connection Machine*, capables uniquement de renifler la case du damier présente devant elles, puis soit d'avancer soit de tourner à 90° à droite ou à gauche. Les fourmis avaient chacune 100 coups à jouer, selon un tracé tout à fait aléatoire au début. Un système de scoring permettait d'évaluer les fourmis les plus efficaces : une fourmi parvenant à suivre les 82 cases en moins de 100 coups atteignaient le score de 82, contre 1 pour les fourmis se perdant dès le premier coup. A la fin de chaque série, seules les fourmis ayant les plus haut score pouvaient se reproduire et transmettre leur génotype à leurs descendantes, augmentant systématiquement leur score à chaque génération.

Dès leur premier essai, et en moins de deux heures, le tracé fût identifié par une génération de fourmis devenues expertes en suivi de piste.

LA « LOI DU FITTEST » OU LA SELECTION NATURELLE DE SOLUTIONS OPTIMALES A UN ENVIRONNEMENT

La comparaison entre la simulation de Resnick et celle de Jefferson et Taylor est riche d'enseignements :

La première en effet permet de simuler l'émergence de phénomènes au niveau macro à partir de règles d'interaction au niveau micro, ainsi que de ressources et d'un environnement donnés. La modification des paramètres permet de voir comment la colonie s'adapte aux nouvelles contraintes.

La seconde va beaucoup plus loin car elle permet de résoudre un problème d'optimisation en simulant non pas le fonctionnement d'une colonie de fourmis mais l'évolution de cette colonie de fourmis sur plusieurs générations vers celle qui sera la plus adaptée à l'environnement donné. Cet environnement représente le problème à optimiser, avec sa topologie, ses ressources, ses attracteurs, ses contraintes,...

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

L'approche informatique évolutionniste peut ainsi être définie comme un moteur de recherche massivement parallèle générant de larges populations de solutions possibles à un problème complexe, et les optimisant de manière itérative par un processus inspiré de la génétique et de la sélection naturelle (sélection, croisement, mutation, remplacement, arrêt,...).

Les algorithmes évolutionnaires font donc évoluer des populations d'individus, représentés chacun par leur génotype, exprimé lui-même sous la forme d'un phénotype (caractère observable, output,...). Chaque individu est évalué selon un critère d'adaptation, son fitness. Plus le fitness d'un individu est élevé, plus il a de chances d'être sélectionné, de se reproduire, et donc de disséminer son génotype plus « performant » dans la population.

La population initiale est générée aléatoirement, et certaines opérations peuvent être également déclenchées de manière partiellement aléatoire (sélection, reproduction, mutation), ceci afin de maintenir une diversité d'individus permettant d'explorer une plus grande variété de solutions possibles, et contrer le phénomène de convergence parfois trop rapide vers une solution plus locale qu'optimale.

Les travaux de Fraser et Holland sur l'algorithme génétique ajoutèrent ainsi à l'approche des automates cellulaires et des SMA une technique clé, les algorithmes génétiques, et donnèrent naissance à un nouveau champ complet de recherche et d'expérimentation informatique sous le terme générique de calculs et d'algorithmes évolutionnistes (evolutionary algorithms / EA, evolutionary computation / EC), et regroupant la programmation génétique (genetic programming / GP, 1958 : Friedberg, Samuel, Cramer, Hicklin, Koza), la programmation évolutionniste (evolutionary programming / EP, 1964 : Dr. Lawrence J. Fogel et Owens, Walsh, Eiben, Smith), ainsi que les stratégies d'évolution (Evolution Strategy / ES, 1973 : Dr. Ingo Rechenberg, Dr. Hans-Paul Schwefel)<sup>59</sup>.

## MODELISER LA VILLE COMPLEXE

Nous nous proposons dans ce chapitre d'aborder les techniques informatiques multi-agents et évolutionnistes comme outils de modélisation de bâtiments, villes et territoires considérés comme systèmes complexes auto-organisés aux propriétés émergentes.

## LES FONDEMENTS DU DESIGN PARAMETRIQUE ET DE LA SYNTAXE SPATIALE

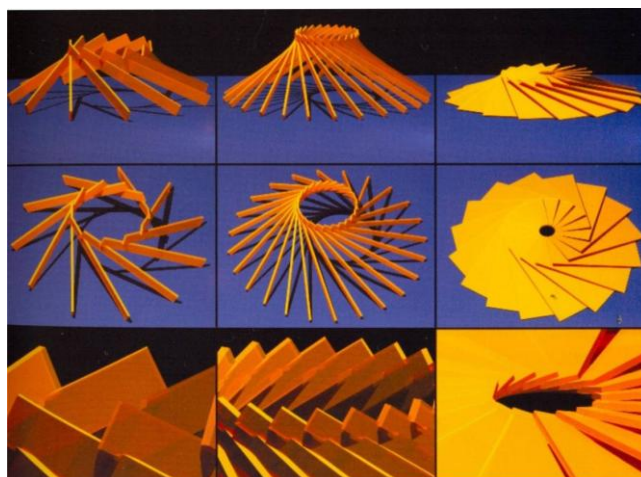
### MODELISER LA COMPLEXITE SYSTEMIQUE AVEC LE DESIGN PARAMETRIQUE

Le design paramétrique est une technique et méthodologie de conception qui provient du domaine de la construction aéronautique et automobile et a été seulement assez récemment appliquée à l'architecture et à l'urbanisme, notamment sous l'influence durant les années 90 des travaux de Robert Aish, Lars Hesselgren, J. Parrish et Hugh Whitehead, du SmartGeometry Group.<sup>z</sup>

Le design paramétrique repose sur une approche systémique d'un objet, considéré comme l'ensemble de ses éléments et de leurs interrelations. Dès lors, la modification des paramètres d'un élément est répercutée en temps réel sur les autres éléments avec lesquels il est en relation, au sein d'une géométrie associative générée par les paramètres eux-mêmes.

Encore largement utilisés dans une logique de visualisation et rendus 3D, à l'instar de logiciels dédiés à la représentation et l'animation comme 3DS Max<sup>aa</sup>, Maya<sup>bb</sup> ou Cinema4D<sup>cc</sup>, ces logiciels de design paramétrique n'ont été exploités que très tardivement dans une logique de recherche et génération de formes. En effet, un des grands avantages du design paramétrique est de permettre au designer de générer et tester un nombre important de modèles, en modifiant simplement quelques paramètres.

Branko Kolarevic, un des pionniers du design paramétrique appliqué à l'architecture et directeur du programme d'Integrated Design à l'université de Calgary



Variations géométriques d'un même modèle paramétrique, en modifiant uniquement la valeur des paramètres. Source : Kolarevic, *Architecture in the digital age: design and manufacturing*, London: Taylor & Francis, 2005 – p153

<sup>z</sup> <http://www.smartgeometry.org>

<sup>aa</sup> <http://www.autodesk.fr/adsk/servlet/pc/index?siteID=458335&id=14642301>

<sup>bb</sup> <http://www.autodesk.fr/adsk/servlet/pc/index?siteID=458335&id=14657544>

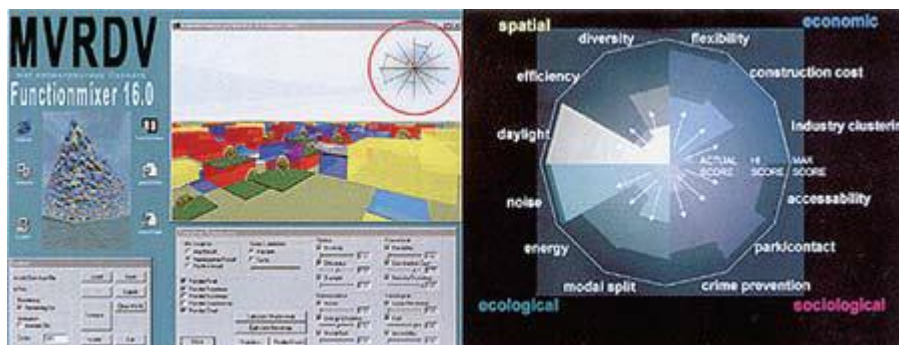
<sup>cc</sup> <http://www.maxon.net/fr/home.html>



# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

au Canada, montre dans son ouvrage de référence *Architecture in the digital age: design and manufacturing*<sup>60</sup>, que de nouveaux concepts, issus de l'informatique, de l'intelligence artificielle et du calcul évolutionniste, sont ainsi progressivement apparus en architecture et urbanisme, sous la terminologie générale d'architecture digitale et les concepts sous-jacents de « espace topologique (architecture topologique), surfaces isomorphiques (architecture isomorphique), mouvements cinématiques et architecture dynamique (animé), animation (architecture métamorphique), algorithmes génétiques (architecture évolutionnaire) et design paramétrique (architecture paramétrique) ».

D'abord utilisé en architecture par de jeunes architectes tels que SUBDV et dECOi Architects, ainsi que par des agences internationales comme Zaha Hadid Architects, Foster & Partners ou UN Studio, des outils ont été progressivement introduits dans le champ de l'urbanisme par des chercheurs comme Nicolai STEINØ et Niels VEIRUM, du département d'Architecture, Design et



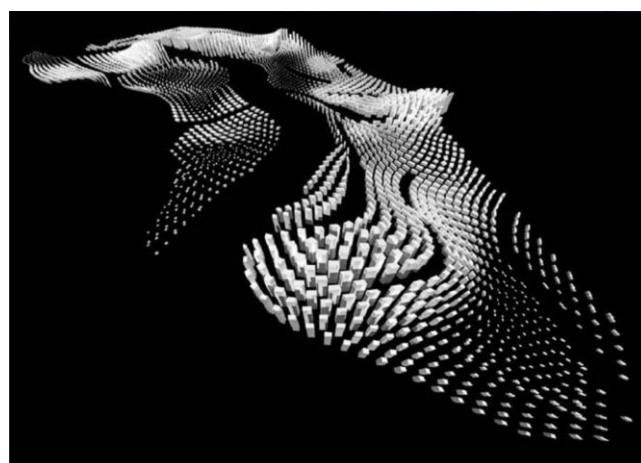
Le Functionmixer de MVRDV. Source : KM3, MVRDV, Actar, Barcelone (2005), p. 1276

Technologie des Medias à l'Université d'Aalborg au Danemark, ou David Jason Gerber, architecte et professeur assistant à l'école d'architecture de la University of Southern California, Vice President du Marketing chez Gehry Technologies<sup>dd</sup>. Ces chercheurs citent eux-mêmes les premières expériences conduites par des agences telles que MVRDV<sup>ee</sup> avec Function Mixer, l'architecte danois Robert Haff-Jensen avec le Dynamic Myllypuro Masterplan, Lykke-Olesen et son projet urbain de thèse, le Design Research Lab de l'Architectural Association de Londres avec Space Alliance, Zaha Hadid Architects avec le One North Masterplan de Singapour et le Media Lab du MIT avec le projet Smart Cities, coordonnés par le Professeur William J. Mitchell.<sup>61 62</sup>

Suite à leurs expériences et celles des projets étudiés, Nicolai STEINØ et Niels VEIRUM affirment que « Des aspects tels que la densité, les usages, la forme, l'espace et la typologie – sujets appartenant typiquement au champ de l'urbanisme – peuvent tous être définis paramétriquement. C'est pourquoi il est possible non seulement d'assurer un processus systématique de conception, mais également d'évaluer les pour et contre de scénarios selon les différents réglages paramétriques de chaque variable ».<sup>63</sup>

Robson Canuto da Silva, architecte et chercheur en morphologie architecturale et urbaine ainsi qu'en technologies informatiques appliquées à l'architecture et l'urbanisme, et Luiz Manuel do Eirado Amorim, professeur à l'universidade Federal de Pernambuco où il coordonne le laboratoire des études avancées en architecture et le groupe de recherche en morphologie architecturale et urbaine, estiment néanmoins dans *Parametric urbanism: emergence, limits and perspectives of a new trend in urban design based on parametric design systems*<sup>64</sup> que c'est l'agence internationale Zaha Hadid Architects<sup>ff</sup>, et notamment son associé Patrik Schumacher, qui a le plus exploité<sup>gg</sup> et théorisé le design paramétrique en urbanisme, en faisant même une nouvelle discipline voire un style architectural à part entière, qu'il nomme *Parametricism*, « émergeant de l'exploitation créative de systèmes de design paramétriques ayant pour but d'articuler des institutions et processus sociaux de plus en plus complexes ». Il ajoute : « Le parametricisme est le nouveau style après le modernisme. Postmodernisme et déconstruction étaient des épisodes prématurés de transition ».<sup>65</sup>

Une notion clé de l'urbanisme paramétrique est celle de champs de forces, dans une logique très Deleuzienne, et à l'opposé du concept d'espace uniforme du modernisme. D'après Schumacher, « les champs sont pleins, comme remplis par un médium liquide. [...] Nous aimerions penser à des essaims de bâtiments planant sur le paysage. [...] Au



Le Thames Gateway comme champs urbain, Zaha Hadid Architects, *Global Cities at the Tate Modern*, Londres, 2007  
<http://www.zaha-hadid.com/exhibitions/global-cities-at-the-tate-modern>

<sup>dd</sup> <http://www.djgerber.com/>

<sup>ee</sup> <http://www.mvrdv.nl/>

<sup>ff</sup> <http://www.zaha-hadid.com/>

<sup>gg</sup> voir plus loin le plan d'urbanisme de Kartal-Pendik à Istanbul dans « Exemples d'application à l'urbanisme »

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

sein des champs, seules les qualités globales et régionales ont de l'importance : biais, dérives, graduations, et peut-être même des singularités telles que l'irradiation des centres. La déformation ne signifie plus rompre avec l'ordre, mais la fidèle reproduction d'une information légitime. »<sup>66</sup>

## MODELISER LES INTERACTIONS SOCIALES ET SPATIALES URBAINES AVEC LA SYNTAXE SPATIALE

Silva et Amorim démontrent bien dans leur article *Parametric urbanism: emergence, limits and perspectives of a new trend in urban design based on parametric design systems*<sup>64</sup> le grand intérêt des modèles de design paramétrique pour articuler de manière systémique les paramètres formels (forme urbaine et tissu urbain, aspects géométriques des blocs,...), programmatiques (les différents usages et fonctions prévus), et environnementaux (les données physiques du site).

Par contre, ils mettent en exergue, en se basant sur les travaux de Fréderico Holanda, professeur à l'Université de Brasilia (UNB), un paramètre fondamental selon eux en urbanisme et qui n'est pris en compte jusqu'à présent ni dans les théories de l'urbanisme, ni a fortiori dans les modélisations paramétriques : le paramètre d'organisation spatiale.

Le paramètre spatial est issu de la théorie de la syntaxe spatiale (space syntax) développée par le professeur Bill Hillier et Julienne Hanson, à la Bartlett, University College London, au début des années 80, pour aider les architectes à anticiper les impacts sociaux de leurs créations. Depuis, de nombreux logiciels de Syntaxe Spatiale<sup>hh</sup> ont été employés en urbanisme, architecture, voire même architecture d'intérieur, ainsi que dans des domaines tels que l'archéologie, les technologies de l'information ou l'anthropologie – leur usage le plus connu restant d'éclairer les relations entre agencement spatial et parcours piétons.

Ils la définissent de la manière suivante : « La syntaxe spatiale a pour principal objectif d'établir les relations entre d'un côté les structures spatiales des villes et bâtiments, et de l'autre la dimension spatiale des structures sociales et les variables sociales plus générales, en essayant de mettre à jour la logique de l'espace architectural et urbain à toute échelle, en tant que logique spatiale des sociétés. »<sup>67</sup>

La syntaxe spatiale est basée sur un certain nombre de concepts clés, dont la notion de distance relative. La distance relative est celle mesurée à partir d'un point mobile, comme par exemple un piéton se déplaçant sur un réseau, vers l'ensemble des points du réseau. Elle mesure donc l'accessibilité des différents points du réseau pour un piéton – par exemple. Le choix (choice measure) est le nombre de parcours les plus courts entre un endroit donné et tous les autres endroits. Ces mesures sont souvent capées par une limite, comme par exemple une distance maximale parcourue en voiture.

La mesure géométrique de la syntaxe spatiale ajoute la notion cognitive de perception de l'espace par un agent, qui peut être évalué de simple à complexe. En effet, au-delà des mesures métriques de la distance relative, le chemin pris par un piéton n'est pas forcément le plus court, mais souvent le plus simple à retenir – bien que l'explosion des GPS et iPhone permettent maintenant de trouver systématiquement le chemin le plus court.

Un des principaux objectifs de la Syntaxe Spatiale en planification urbaine est de maximiser l'agglomération spatiale tout en minimisant ses effets de congestion sur les réseaux de transport, à travers l'optimisation du design des réseaux de transports et de la localisation des points d'attraction (équipements publics, zone commerciale, équipements de loisirs,...).

Pour Fréderico Holanda,, « L'espace est la syntaxe de l'environnement urbain, un système de barrières et perméabilités au mouvement des gens sur le sol. [...] Les barrières et perméabilités physiques au sol (syntaxe) s'imbriquent dans les règles d'usage (sémantique) qui ajoutent un sens symbolique à la syntaxe de l'endroit et aide à former – produire et reproduire – les formes d'interaction sociale. [...] L'organisation spatiale de l'habitat humain, que ce soit sous la forme de villes ou de bâtiments, a pour effet d'établir des types de relations consistant en barrières et perméabilités de différentes sortes. [...] Ces barrières et perméabilités sont, en fait, les sanctions physiques d'un système de rencontres et restrictions qui constitue la société ».<sup>68</sup>

Holanda a étudié et comparé selon cette approche de syntaxe spatiale les morphologies des établissements humains Maya et Hopi en Amérique, Zoulou et Ashanti en Afrique, des châteaux féodaux en Europe et des villes-états italiennes de la haute Renaissance, ainsi que de nombreuses villes brésiliennes.

Holanda suggère que les différents types d'établissements humains identifiés tout au long de l'histoire se situaient entre deux polarités spatiales : « le paradigme d'urbanité et de formalité ». D'après lui, le paradigme d'urbanité recouvre des villes où s'expriment librement les différences et où la participation citoyenne est intense, s'inscrivant dans des valeurs démocratiques. Le paradigme formel au contraire s'applique à des villes où l'organisation sociale est fortement segmentée, isolée, cérémonieuse et hiérarchique, caractérisée par des relations de pouvoir.

---

<sup>hh</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_spatial\\_analysis\\_software](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_spatial_analysis_software)



# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

## LES APPORTS DES SYSTEMES MULTI-AGENTS, DES ALGORITHMES GENERATIFS ET GENETIQUES

Au-delà des approches paramétriques ou spatiales, un certain nombre de techniques d'avant-garde s'inspirant des systèmes complexes, de la théorie de l'évolution et de l'émergence, s'avèrent particulièrement bien adaptées à la modélisation urbaine, tant dans sa structure, sa dynamique que ses formes. Elles font appel aux automates cellulaires, aux systèmes multi-agents, à l'intelligence des essaims, aux L-systems, ou encore aux algorithmes génétiques.

Un des premiers architectes à avoir intégré l'approche évolutionniste dans ses recherches est très probablement John Frazer, dont l'ouvrage *An Evolutionary Architecture*<sup>69</sup>, écrit en 1996 et décrivant les sept années de recherche menées à l'Architectural Association de Londres, fait aujourd'hui encore référence. Automates cellulaires, systèmes génératifs, algorithmes génétiques,...il explora avec ses élèves la plupart des outils issus du calcul évolutionniste et plaça dès la fin des années 80 l'Architectural Association à la pointe de ce domaine d'investigation.

Passons ici en revue ces différentes techniques dans leur application à l'urbanisme.

### SIMULER LES STRUCTURES URBAINES AVEC LES AUTOMATES CELLULAIRES ET LES SYSTEMES MULTI-AGENTS

Michael Batty, professeur d'urbanisme à la Faculty of the Built Environment de l'University College London, et directeur du Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), mène des recherches sur le développement de modèles informatiques de villes et régions axés sur la morphologie et la dynamique urbaine.

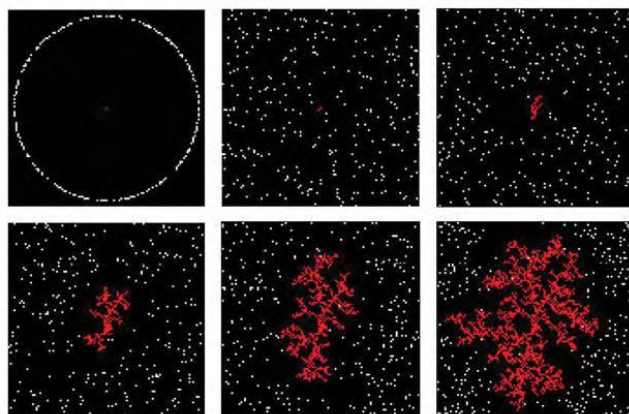
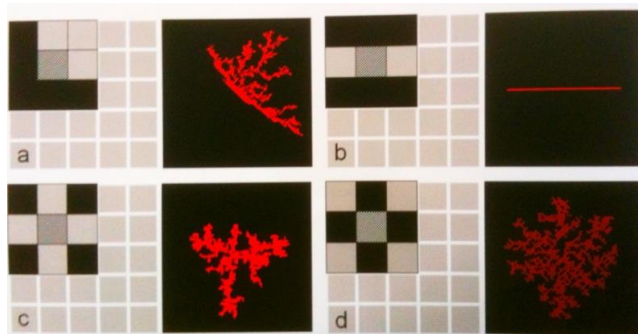
Dans son livre *Cities and Complexity*<sup>70</sup>, il montre que la structure des villes est fractale, spécialement les villes qui ont connues une croissance organique, à l'instar des villes médiévales européennes, et que leur croissance peut être simulée par des automates cellulaires.

Un tel modèle doit selon lui reposer au minimum sur deux règles de base :

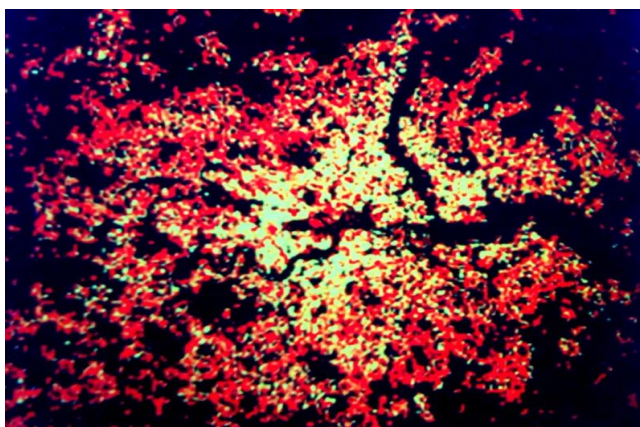
1. Les gens se rassemblent et s'agrègent en ville pour faire des économies d'échelle résultant de leur agglomération (voir plus haut les théories de Krugman). La conséquence spatiale est qu'ils doivent toujours être connectés les uns aux autres.
2. Les gens souhaitent toujours vivre avec un maximum d'espace autour d'eux

Ces deux forces contradictoires, l'une centripète et l'autre centrifuge, sont pour Batty l'équivalent de codes génétiques, en ce qu'elles induisent la réaction de la cellule à l'arrivée d'un agent, et réciproquement la réaction de l'agent lorsqu'il arrive sur une cellule : elles codent l'expression (phénomène) de l'agent en fonction de ses interactions avec son environnement.

En utilisant StarLogo, le logiciel développé par Mitch Resnick au MIT pour la simulation d'intelligence des essaims (Swarm Intelligence), Batty a simulé l'évolution du phénomène d'attraction / répulsion à partir d'une population d'agents mobiles et d'un premier agent sédentaire<sup>71</sup>. A l'initialisation, la population d'agents mobiles est disposée tout autour d'un cercle dont le centre est occupé par l'agent sédentaire. La règle de voisinage est établie, déterminant le comportement d'un agent mobile lorsqu'il rencontre un agent sédentaire. Selon la règle choisie, et en ajoutant éventuellement des contraintes en fonction du terrain réel (ne pas s'installer sur les cellules « cours d'eau », ne pas s'installer sur les cellules de trop grande déclivité,...), les agents mobiles vont progressivement se sédentariser selon une morphologie extrêmement proche du développement réel d'une ville.



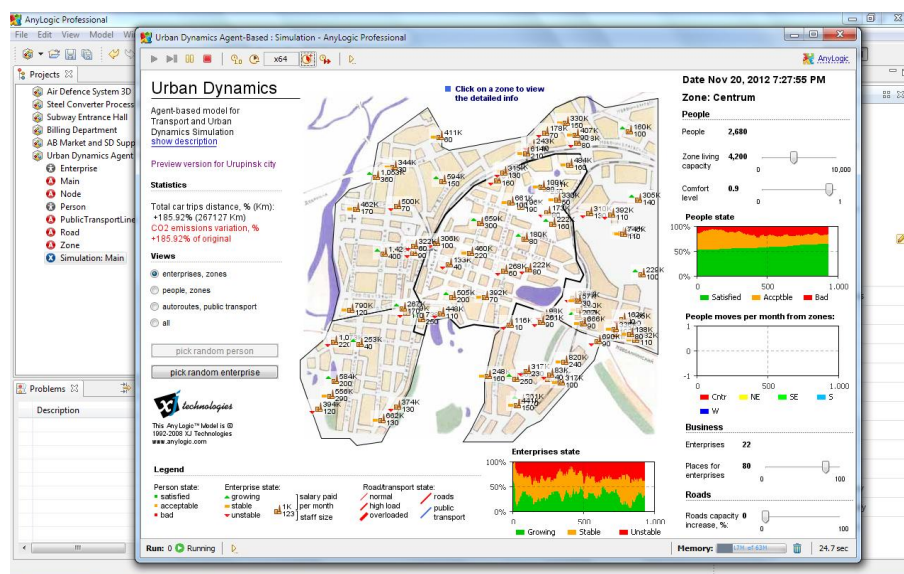
Développement d'une forme urbaine sur StarLogo en fonction de règles de voisinage.



Carte des densités de population du Grand Londres.

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

Un certain nombre de systèmes multi-agents (SMA), le plus souvent en open source ou freeware, peuvent être utilisés pour effectuer des simulations dynamiques urbaines en fonction de multiples contraintes, comme Swarm<sup>ii</sup>, le premier SMA conçu dans les années 90 par Chris Langton (1949), l'un des fondateurs du concept de la vie artificielle<sup>72</sup> (1987, Los Alamos National Laboratory), NetLogo, développé par Uri Wilensky en 1999 au Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling de la Northwestern University, dans l'esprit du langage LOGO de Seymour Papert et de StarLogo de Mitch Resnick,



Modélisation urbaine sous AnyLogic

Repast<sup>jj</sup>, développé à l'Université de Chicago, ainsi que AnyLogic (<http://www.xjtek.com/>), Processing (<http://processing.org/>), ou encore Ascape (<http://ascape.sourceforge.net/>)<sup>73</sup>. Certains SMA sont même spécialisés dans la modélisation urbaine, comme OBEUS (Object-Based Environment for Urban Simulation), UrbanSim ([www.urbansim.org](http://www.urbansim.org)) ou encore en France le logiciel Cormas (<http://cormas.cirad.fr/fr/outil/outil.htm>) du CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement), spécialisé dans la modélisation des relations entre les sociétés et leur environnement.

## CONCEVOIR UNE ECOLOGIE URBAINE AVEC LA MODELISATION GENERATIVE DES L-SYSTEMS

De nombreuses équipes de recherche travaillent sur la modélisation informatique de l'auto-organisation du monde vivant. L'équipe du Professeur Przemyslaw Prusinkiewicz, du Department of Computer Sciences de l'Université de Calgary<sup>kk</sup> au Canada, est particulièrement en avance dans la modélisation de la croissance et du développement des plantes, à partir des théories de Lindenmayer et des L-systems<sup>ll</sup><sup>74</sup>.

Un L-system est ce que l'on appelle en informatique une grammaire formelle générative, concept introduit par Noam Chomsky (1928), linguiste et philosophe américain fondateur de la linguistique générative, et consistant en une structure abstraite décrivant un langage formel à travers les séquences possibles de chaînes de caractères. Contrairement à une grammaire analytique, qui détermine dans une approche descendante et aristotélicienne si une chaîne de caractère fait ou non partie d'un langage, une grammaire générative définit dans une approche ascendante et itérative un algorithme qui génère les chaînes de caractères dans un langage donné selon un ensemble de règles de transformation.

Le grand intérêt des L-systems pour modéliser la croissance des plantes est que ces règles de transformation sont appliquées en parallèle à tous les symboles de la chaîne de caractère à chaque itération. En d'autres termes, les formes de tous les éléments de la plante sont recalculées à chaque étape de la croissance en fonction à la fois de l'organisation interne et des contraintes environnementales. Ces éléments peuvent être au

*Modélisation de la croissance du Lychnis Coronaria basée sur un L-system sans contraintes contextuelles. Généré avec L-Studio, un logiciel développé au Department of Computer Science de l'Université de Calgary, Canada*



<sup>ii</sup> [http://www.swarm.org/index.php/Main\\_Page](http://www.swarm.org/index.php/Main_Page)

<sup>jj</sup> Recursive Porous Agent Simulation Toolkit

<sup>kk</sup> <http://algorithmicbotany.org/>

<sup>ll</sup> Voir plus haut, « l'émergence des formes par les processus »



# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

niveau local des cellules de la plante, au niveau régional des différentes « organes » de la plante, tels que nœuds, bourgeons, feuilles, ou au niveau de la plante dans son ensemble. Les variables influençant la croissance des plantes peuvent dès lors être modifiées, comme par exemple le vent ou l'ensoleillement, entraînant une morphogenèse différente.

Prusinkiewicz définit une plante selon le principe écologique d'une population de modules semi-autonomes, et décrit sa croissance comme l'intégration des activités de ces modules. L'intérêt des L-systems est, selon lui, de pouvoir modéliser des parties de plantes, ou des plantes entières, ou encore des groupes de plantes selon une écologie donnée.<sup>75</sup>

Une des caractéristiques les plus intéressantes des L-systems est l'intégration de fonctions biomécaniques permettant d'intégrer au développement de la plante des variables exogènes tels que la gravité, le tropisme, la force des vents,...

D'après Michael Hensel, architecte-urbaniste, chercheur et écrivain, associé au sein de Ocean North et du Emergence and Design Group, la modélisation informatique basée sur les L-systems pourraient permettre d'imaginer des bâtiments parfaitement adaptés à leur contexte, car conçus en fonction d'un côté, de contraintes organisationnelles et programmatiques internes et, de l'autre côté, des influences de leur environnement.<sup>76</sup>

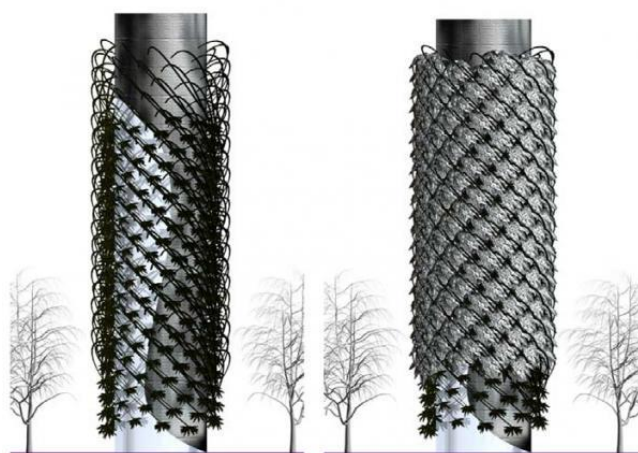
Ainsi, un bâtiment pourrait-il être conçu en intégrant dans le processus génératif à la fois la nature de ses éléments constructifs, les objectifs programmatiques (surface vitrée, accès et circulations, surfaces des différents programmes,...), et les paramètres de l'environnement (parcours du soleil, zones d'ombre, direction des vents dominants,...).

Et effectivement, les premières recherches dans les domaines du calcul génératif permettent d'élaborer des systèmes constructifs complets à partir de multiples paramètres et contraintes internes et externes pour atteindre des objectifs de performance déterminés.

Dennis Dollens, professeur au sein du programme d'architecture biodigitale à l'école d'architecture de l'Universitat Internacional de Catalunya, et auteurs des très téléchargés Digital-Botanic Architecture eBooks<sup>77</sup>, a élaboré de nombreux modèles de bâtiments poussant comme des plantes.

Il utilise pour cela le logiciel X-Frog<sup>mm</sup>, lui-même basé sur les L-systems de Lindenmayer, pour générer les formes végétales sous contraintes, à partir de la bibliothèque de plus de 2000 modèles de plantes répertoriées par les botanistes partenaires de Xfrog, Inc..

Ses travaux sont en quelque sorte l'écho paramétrique de ceux de Luc Schuiten, dessinés à la main, sur les Habitarbres, Archiborescences et Cités Végétales<sup>78</sup>. Schuiten envisageait par contre directement le déploiement de constructions végétales à l'échelle de la ville, tout comme Hernan Diaz Alonso, architecte et fondateur de l'agence Xefirotarch<sup>nn</sup>, auteur du film Chlorofilia<sup>79</sup> réalisé avec Imaginary Force pour le concours « City of the Future », et où une ville organique vivante se développe sur les ruines de Los Angeles, cultivée par des architectes devenus botanistes.



*BioTower 2009, Dennis Dollens : eTree et ses branches, feuilles, fleurs, modélisé par informatique dans le cadre d'une expérience sur les fonctions actives sur le plan environnemental, dans l'objectif de créer une architecture biomécanique vivante.*



*Les cités végétales, Luc Schuiten, 2009*



*Chlorofilia, Herman Diaz Alonso (Xefirotarch) et Peter Frankfurt (Imaginary Forces)*

<sup>mm</sup> <https://xfrog.com/>

<sup>nn</sup> <http://www.xefirotarch.com>

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

C'est justement à l'échelle de la ville que les travaux du Professeur Przemyslaw Prusinkiewicz nous intéressent particulièrement ici. En effet, au-delà de la morphogenèse d'organismes individuels et de leur comportement, basés sur les théories de la biologie du développement et de l'écologie comportementale, l'équipe de Calgary a développé des outils de simulation à l'échelle de populations et communautés de plantes, en particulier sur leur distribution spatiale en fonction des paramètres environnementaux.

D'après le Docteur Martin Hemberg, concepteur du logiciel de modélisation Genr8 et tuteur à l'Architectural Association de Londres, ce niveau de modélisation d'écosystèmes complets est extrêmement complexe car il inclut :

- La forme et les caractéristiques de chaque individu, qui doit être cohérente avec leur position au sein de l'écosystème et les apports locaux de l'environnement
- Les interactions entre les individus et avec leur environnement spécifique

Le modèle de l'équipe de Prusinkiewicz est double :

- Un méta-modèle détermine la prolifération et distribution des plantes,
- Un infra-modèle détermine les formes et caractéristiques de plantes individuelles en fonction de leur emplacement dans l'écosystème

Michael Hensel souligne tout le potentiel que cette approche pourrait avoir en urbanisme, spécialement dans une logique de ville durable : « les bâtiments pourraient ainsi être répartis et groupés de manière adéquate, afin d'intensifier ou d'atténuer les effets de leur interaction et de son impact sur l'évolution de leurs relations. »

Concrètement, l'urbanisation, considérée comme la prolifération de différentes espèces de « bâtiments », pourrait être modélisée comme la prolifération d'espèces végétales, en fonction d'objectifs tels que la maximisation de l'exposition des « feuilles » panneaux photovoltaïques ou de la minimisation des longueurs des adductions d'eau « racines », ainsi qu'en fonction des caractéristiques globales et locales de l'environnement, tels que la constructibilité du terrain, les règles d'urbanisme (COS, hauteur,...), la topographie,...

## CREER DES MODELES URBAINS DYNAMIQUES ET ADAPTATIFS AVEC L'INTELLIGENCE DES ESSAIMS

Fractales, L-systems et automates cellulaires sont néanmoins limités par leur propre logique interne, définie dès l'origine. Ainsi dans le cas des SMA à automates cellulaires, la règle de voisinage ainsi que les propriétés de l'environnement sont déterminées dès l'initialisation et ne peuvent pas, pour la plupart des SMA, être modifiées. Ils s'avèrent ainsi limités pour simuler des dynamiques urbaines réelles où d'un côté les agents font évoluer leur comportement en fonction des autres agents et de l'environnement, et où d'un autre côté l'environnement lui-même est modifié, en particulier par l'action des agents, et oblige en retour ces derniers à adapter leur comportement.



*Swarm Urbanism, Melbourne Docklands, Kookugia, 2008*

Seuls un SMA où les agents interagissent entre eux et avec leur environnement, et sont capables de faire évoluer leur comportement en conséquence, peuvent permettre d'approcher plus finement la dynamique urbaine. Neil Leach, architecte et théoricien de l'architecture enseignant à University of Southern California et spécialiste du design digital en architecture et urbanisme, souligne que « l'avantage d'un véritable système émergent ascendant, où l'intelligence des essaims est basée sur des agents réellement autonomes interagissant entre eux est que, en offrant une traduction comportementale de la topologie et de la géométrie, il génère des outputs extrêmement variés » - spécialement en regard des structures générées par les automates cellulaires<sup>80</sup>.

L'agence Kookugia ([www.kookugia.com](http://www.kookugia.com)) a mis en place une réelle approche ascendante "d'urbanisme des essaims", notamment à travers leur projet d'étude « Swarm Urbanism » réalisé en 2008 pour les Docklands de Melbourne en Australie. Kookugia indique que cette étude représente un changement de paradigme depuis le plan d'urbanisme vers l'algorithme d'urbanisme comme outil de conception de la ville<sup>80</sup>.

L'agence Kookugia ([www.kookugia.com](http://www.kookugia.com)) a mis en place une réelle approche ascendante "d'urbanisme des essaims", notamment à travers leur projet d'étude « Swarm Urbanism » réalisé en 2008 pour les Docklands de Melbourne en Australie. Kookugia indique que cette étude représente un changement de paradigme depuis le plan d'urbanisme vers l'algorithme d'urbanisme comme outil de conception de la ville<sup>80</sup>.

<sup>80</sup> "a shift from notions of the master-plan to that of master-algorithm as an urban design tool"

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

Les impératifs de l'urbanisation sont inscrits dans le code d'agents capables de s'auto-organiser, ce qui permet au système urbain engendré de rester flexible en réponse aux changements politiques, économiques ou sociétaux incessants. Kokkugia a programmé deux types d'agents : des agents assembleurs de matière, calqués sur les termites, et des agents créateurs de réseaux, calqués sur les fourmis. Tout une écologie de systèmes d'agents, dotés chacun de désirs et informations, interagissent entre eux pour générer les constructions et trajets optimaux par rapport à l'environnement des docklands.

Roland Snooks, Rob Stuart-Smith, Juan de Marco et Timo Carl, les jeunes associés de Kokkugia précisent : « notre méthodologie de design ne vise pas à créer une unique solution optimale, mais plutôt un état dynamiquement stable se nourrissant des relations instables qu'il contient »...une définition assez proche de celle de l'homéostasie.

## OPTIMISER LES FORMES URBAINES AVEC LES ALGORITHMES EVOLUTIONNISTES

Dr Una-May O'Reilly, chercheur au MIT Computer Science and Artificial Intelligence Lab et Présidente du Evolutionary Design and Optimization group, a mené un groupe de recherche interdisciplinaire comptant informaticiens et architectes, où a été développé par Martin Hemberg un prototype de logiciel, Genr8<sup>pp</sup>, combinant design génératif, algorithmes évolutionnaires et modélisation d'environnement 3D.

A partir d'un génotype (une géométrie unitaire et des règles d'assemblage), ce logiciel permet l'exploration et le développement de surfaces géométriques (le phénotype) dans des espaces 3-D sous contraintes d'environnements virtuels.

Un module évolutionniste génère des populations entières de surfaces sur plusieurs générations. Les surfaces sont générées selon un algorithme imitant la croissance organique, appelé HEMLS (Hemberg-Extended-Map-Lindemayer-System), étendant les L-systems à la génération de surfaces dans des espaces tridimensionnels. Genr8 propose également des grammaires complexes, la possibilité de simuler l'environnement physique, ainsi que l'évaluation automatique de la fonction de fitness des surfaces générées par rapport à l'environnement.

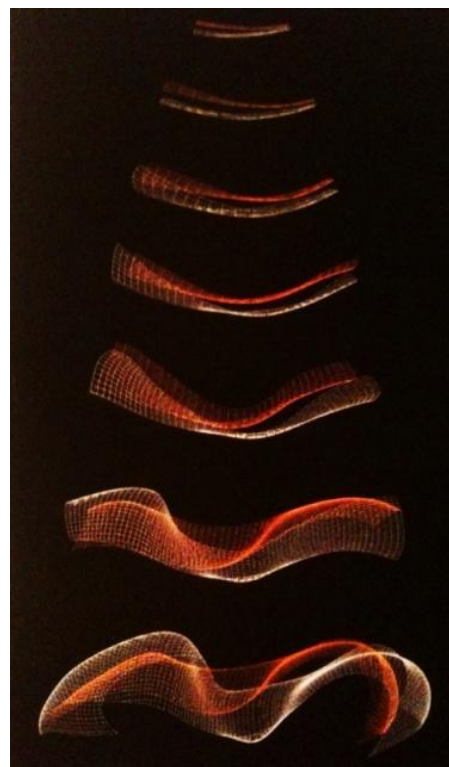
Les surfaces sont générées de manière inclusive, plutôt que de manière incrémentale, de sorte que toutes les parties du système peuvent évoluer durant tout le processus.

De cette manière, il est aujourd'hui envisageable de générer des bâtiments uniquement à partir de paramètres intrinsèques (géométrie, matériaux, fonctions,...) et exogènes (espace disponible, orientation, flux,...), en simulant une évolution accélérée d'une population de bâtiments potentiels.

Appliqué à l'échelle de la ville, des quartiers entiers pourraient ainsi être générés, en combinant design génératif et algorithmes évolutionnistes, à partir de multiples variables telles que l'équilibre de la densité de population, la répartition du programme (commerces, habitat, espaces publics,...), la fluidité maximale des flux de personnes et véhicules, la proximité des commerces aux nœuds d'interconnexions de transports, la maximisation des surfaces au sud ou en bord de mer, voire même les formes stylistiques prédominantes des façades.

L'avantage d'une telle approche est que le système urbain généré est dynamique, et l'équilibre optimum - l'homéostasie - à un instant  $t$  peut évoluer dans le temps avec les multiples variables, permettant à la ville de s'adapter à des modifications de celles-ci ou la prise en compte de nouvelles contraintes : loin d'être figée en un modèle absolu décidé à l'avance, l'urbanisation de la ville devient dynamique, évolutive, souple,...adaptative et résiliente.

Cette nouvelle approche offre une appréhension totalement nouvelle de l'environnement construit, à l'opposé de la conception d'immeubles ou de quartiers entité par entité : il s'agit ici de favoriser la bonne synergie de processus de croissance d'une population écologique d'espaces construits adaptés à leur contexte et à leurs objectifs de performance.



*Le processus morphogénétique de Genr8 produit ici l'imbrication de plus en plus complexes de deux surfaces « coévoluées » simultanément à partir de critères d'adaptabilité et d'articulation géométriques, tout en restant en cohérence avec les contraintes intrinsèques du matériau et exogènes de la fabrication par découpe laser*

<sup>pp</sup> <http://projects.csail.mit.edu/emergentDesign/genr8/>



# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

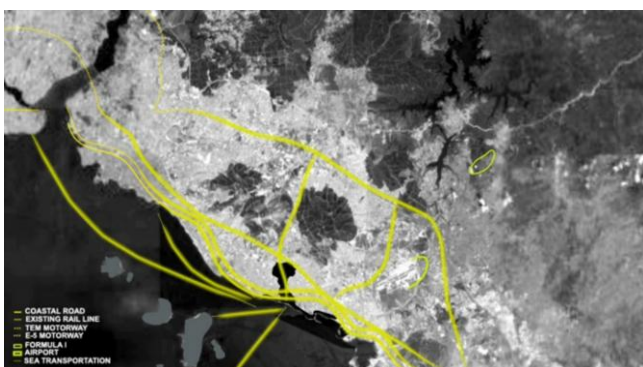
## EXEMPLES D'APPLICATIONS A L'URBANISME

### PLAN D'URBANISME DE KARTAL-PENDIK, PAR ZAHA HADID ARCHITECTS (2006)

L'urbanisme paramétrique morphogénétique a été utilisé, à l'aide de l'une ou l'autre des techniques vues précédemment, pour concevoir un certain nombre de développements urbains.

Le plan d'urbanisme du quartier Kartal-Pendik à Istanbul (2006), conçu par Zaha Hadid Architects<sup>99</sup>, est une bonne illustration d'une telle approche. Le projet a été dirigé par Patrik Schumacher, associé et senior designer au sein de l'agence, co-directeur du Design Research Lab de l'Architectural Association de Londres depuis 1996, et enseignant à Columbia et Harvard. Il explique le projet dans un article paru dans AD Architectural Design<sup>81</sup> :

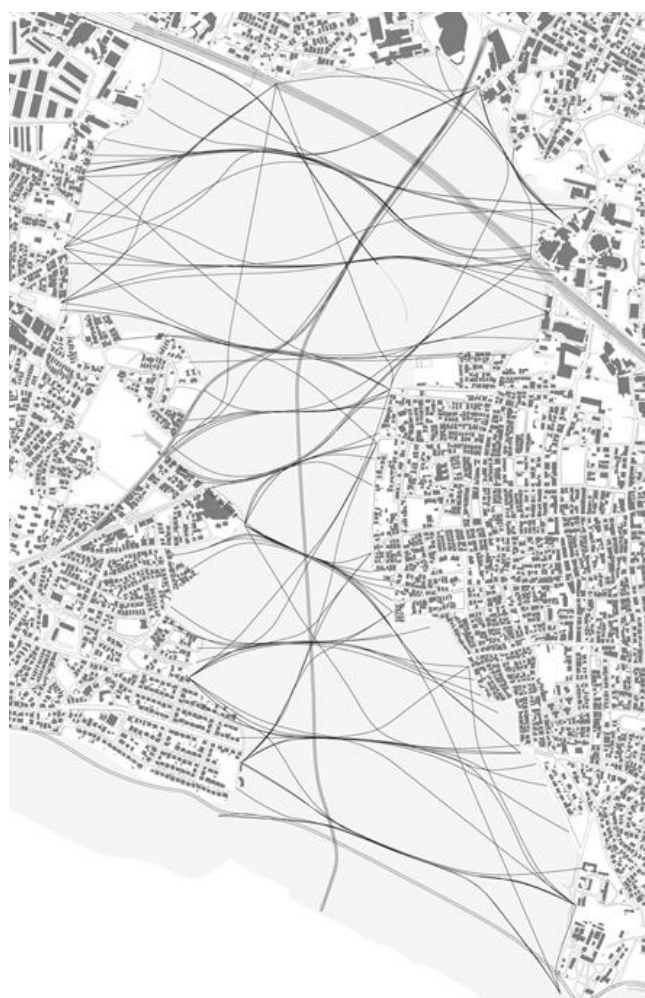
Le projet consiste en la reconversion d'une aire industrielle abandonnée en un nouveau quartier urbain central d'Istanbul d'une grande richesse programmatique, incluant centre d'affaires, résidences de luxe, équipements culturels et de loisirs, dont une marina et de nombreux hôtels.



Réseaux de transport traversant le futur quartier Kartal-Pendik à Istanbul – ZHA 2006

Le programme se répartit sur 555 hectares et représentant 6 millions de m<sup>2</sup> de terrains constructibles. Le site est au croisement de nombreux axes de transport, dont l'autoroute reliant l'Asie à l'Europe, l'autoroute côtière, ainsi que de nombreuses infrastructures ferroviaires.

La première étape de l'agence a été de tenir compte de toutes les voies de circulation entrantes ou adjacentes au site pour générer un premier découpage du terrain. Les axes de circulation ont été prolongés et interconnectés en utilisant le modèle informatique « Whole-Thread » (fil de laine), conçu par Frei Otto, et qui permet de calculer une solution optimale de réseau entre un ensemble de points, optimisant la connectivité totale du réseau et minimisant le détour moyen imposé.<sup>82</sup> Ce modèle de réseau à détour minimal est intégré dans un module du logiciel d'animation Maya, conçu à la base pour simuler les mouvements de cheveux. Les points de contact des axes de circulation entrants et sortants ont été saisis dans le modèle qui a calculé le réseau optimal de circulation, créant un réseau primaire d'axes principaux - ouvrant par la même occasion de larges parcelles pour des parties plus ambitieuses du programme - et un réseau secondaire d'axes doux.



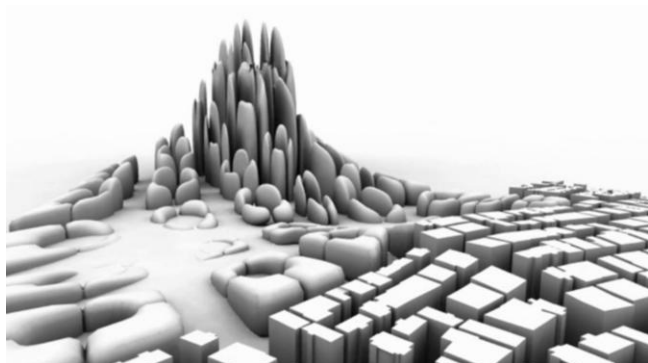
Réseau des circulations optimisé selon le modèle « Whole-Thread » du détour minimal, réalisé avec la fonction « dynamique capillaire » du logiciel d'animation Maya

En parallèle, l'agence a étudié les différentes structures et formes urbaines de blocs et tours, en partant d'un composant génératif – ou « génotype » - permettant de nombreuses variations de formes – ou « phénotypes ».

Les blocs sont générés en corrélant de manière inversée la surface de la parcelle et la hauteur du bâti, de sorte que les cours intérieures se transforment en atriums lorsque la superficie diminue et la hauteur des blocs augmente. La hauteur du bâti dépend également de la largeur totale du site.

<sup>99</sup> <http://www.zaha-hadid.com/home>

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

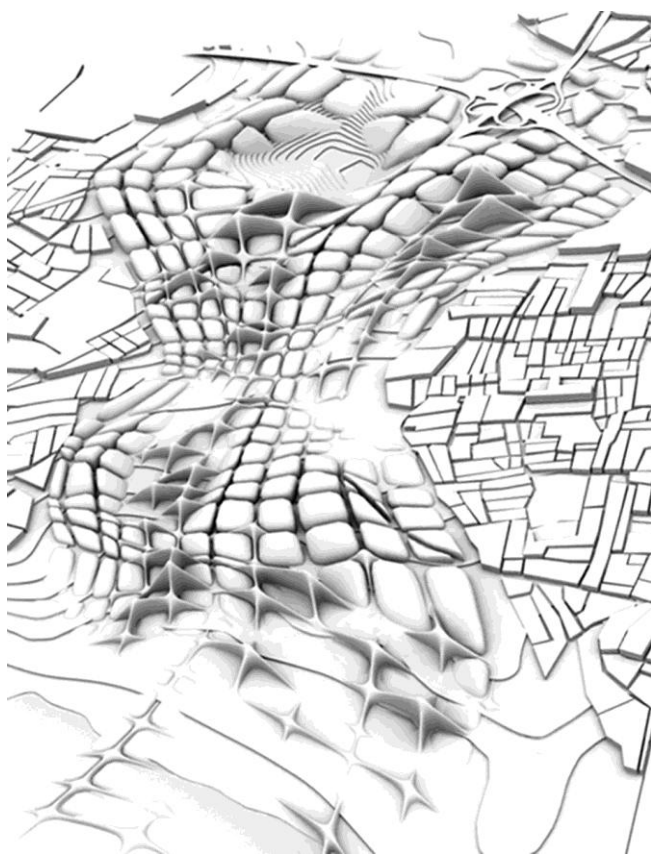


*Istanbul block type 2 Schumacher Zaha-Hadid - 2006*

Le résultat à ce stade, modélisé dans Maya (ci-contre), montre l'inter-articulation entre les tours de carrefours et les blocs, et la variation induite par la corrélation hauteur du bâti / superficie de parcelle.

Une autre règle établit que les blocs sont traversés par le réseau secondaire, coupant chaque bloc en quatre sous-blocs, et renouant ainsi avec la tradition des passages à Istanbul.

Ensuite, une troisième étape a consisté à appliquer un script de calligraphie sur les blocs afin d'y découper les bâtiments eux-mêmes, sur fond de parcs. Ces scripts dessinent sur chaque parcelle le tracé des bâtiments en fonction de plusieurs paramètres, tels que la superficie de la parcelle, ses proportions et son orientation. Le script a également autorisé des variations aléatoires pour générer des ouvertures au sein des blocs.



*Modèle Maya global inter-articulant blocs et tours en fonction des réseaux de circulation et des règles paramétriques*

Zaha Hadid Architects a également travaillé sur d'autres plans d'urbanisme pour le quartier One-North de Singapour (200 hectares d'un centre d'affaires multifonction), Soho City à Pékin (2,5 millions de m<sup>2</sup> de commerces et habitations), ou encore Bilbao (îles de la rivière et quais).

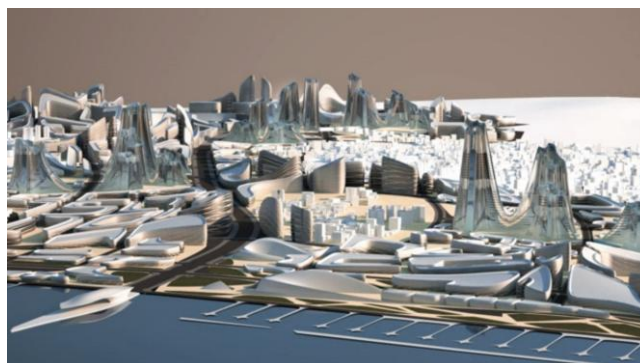
*Modélisation finale du quartier Kartal-Pendik  
Zaha Hadid Architects, 2006*



*Le scripting de la calligraphie des formes de blocs urbains*

Enfin, une dernière étape a consisté à descendre à l'échelle du bâtiment et de l'architecture. Ainsi, un script de calligraphie permet d'assurer une transition entre les motifs des façades côté rue, au relief plus prononcé, vers ceux des façades côté cours. De même, les circulations internes des bâtiments ont été corrélées avec le réseau de circulation secondaire « doux ».

Le résultat, affirme Patrik Schumacher, « est un paysage urbain élégant, différencié de manière cohérente, qui facilite la navigation à travers une élaboration légitime ainsi qu'une accentuation architecturale des propriétés globales et locales. »





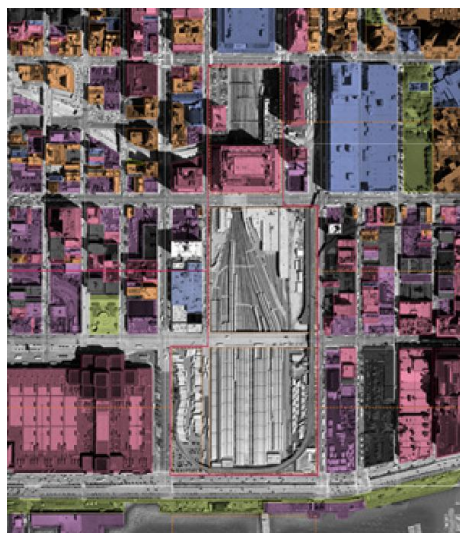
# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

Sur la base de ces expériences, ainsi que des projets d'études menés au Design Research Lab, Schumacher assigne cinq objectifs au design paramétrique :

1. **L'inter-articulation paramétrique de sous-systèmes** : il s'agit ici d'étendre la différenciation de systèmes uniques, comme par exemple les composants d'une façade, à l'association programmée de multiples sous-systèmes, tels que l'enveloppe, la structure, les divisions intérieures, les circulations,...toute modification sur l'un des sous-systèmes étant répercutée immédiatement sur les autres.
2. **L'accentuation paramétrique** : l'objectif est d'augmenter le sentiment général d'intégration organique par le biais de corrélations favorisant l'amplification des écarts, plutôt que leur compensation, ceci dans le but de générer une articulation plus riche du bâti résultant en une meilleure orientation dans la ville.
3. **La figuration paramétrique** : afin d'éviter les configurations trop complexes pouvant parfois émerger des modélisations paramétriques, des paramètres d'ambiance et de vues doivent être intégrés dans le système paramétrique.
4. **La réactivité paramétrique** : la mesure en temps réel des différents modes d'utilisation des édifices et de leur évolution peut nourrir l'adaptation des capacités cinétiques de ces derniers, donnant à l'environnement construit une réactivité à différentes périodes.
5. **L'urbanisme paramétrique, relationnalité profonde** : l'objectif ici est l'intégration totale de l'environnement construit évolutif, de la distribution urbaine à la morphologie architecturale, aux articulations tectoniques détaillées et à l'organisation intérieure.

## QUARTIER URBAN REEF, HUDSON'S YARD, NYC, PAR SHAMPOO (2009)

Urban Reef est un projet de thèse réalisé en 2009 au sein du Design Research Lab de l'Architectural Association de Londres par Pavlos Fereos, Konstantinos Grigoriadis, Alexander Robles Palacio et Irène Shamma.<sup>rr</sup>, du groupe « Shampoo ».



Le site, Hudson's Yard à New York, n'est autre que l'espace situé au-dessus de

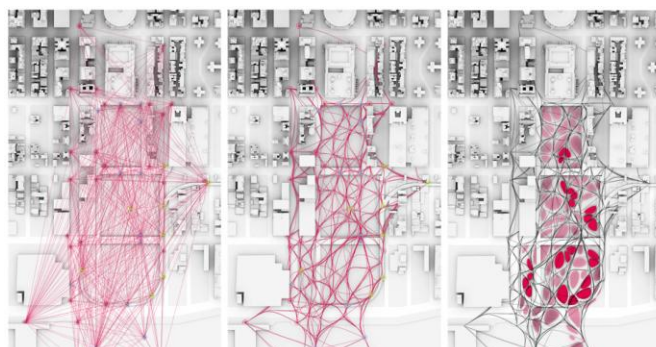


la gare de triage et de chargement de Lincoln Terminal, sur les bords de l'Hudson. Le terrain ne propose que très peu de possibilités d'appui et d'ancrage, notamment en raison d'un tunnel passant sous les rails. Le programme doit donc se développer de manière aérienne.

Là encore, la première étape a consisté à déterminer les nœuds de l'infrastructure du site (arrêts de bus, stations de métro, accès routiers,...), afin de lister les points d'accès et lignes de circulation du projet.

Puis, ici également, une

optimisation du réseau a été effectuée à l'aide de la fonction « dynamique capillaire » (hair dynamic) de Maya, exploitant le Whole-Thread model calculant le détour minimal (image ci-contre). Le maillage optimisé a permis de délimiter les îlots, puis de sélectionner ceux où s'élèveraient les bâtiments.



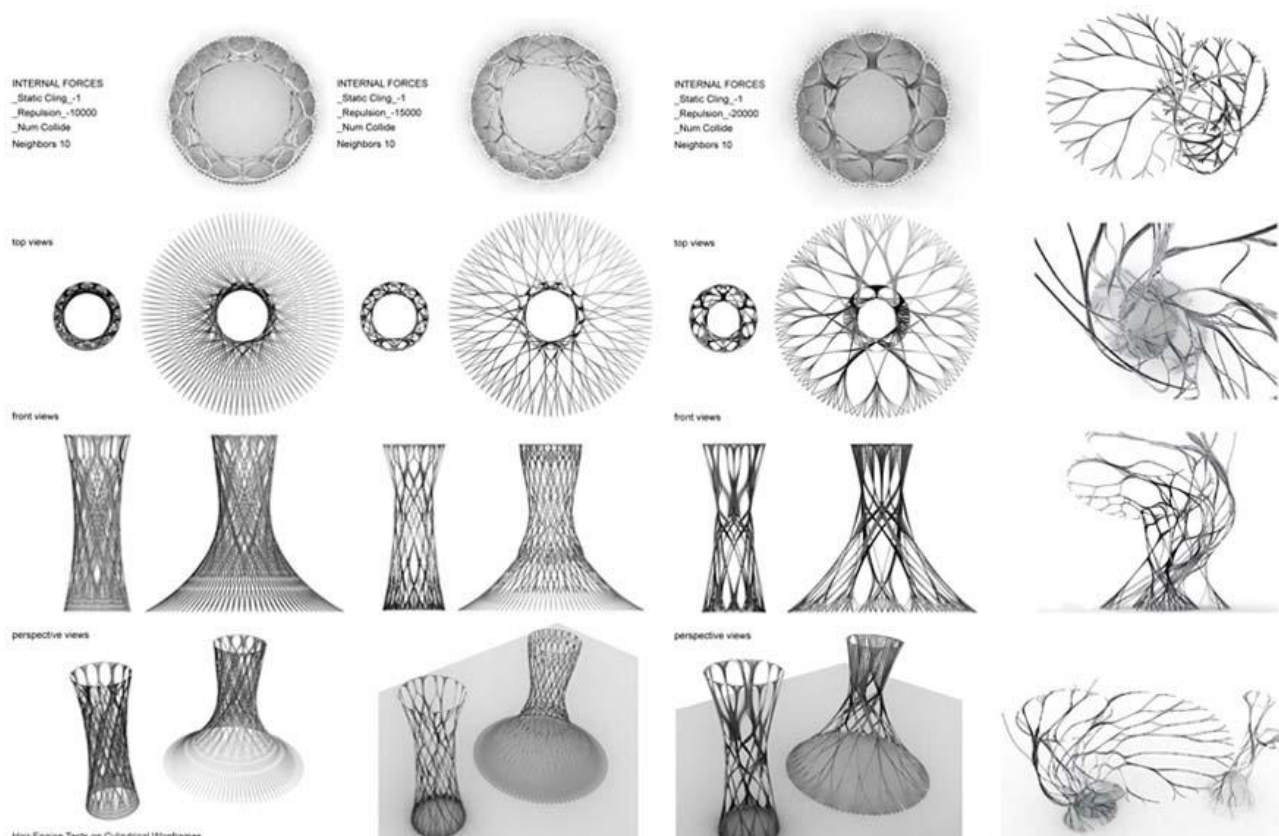
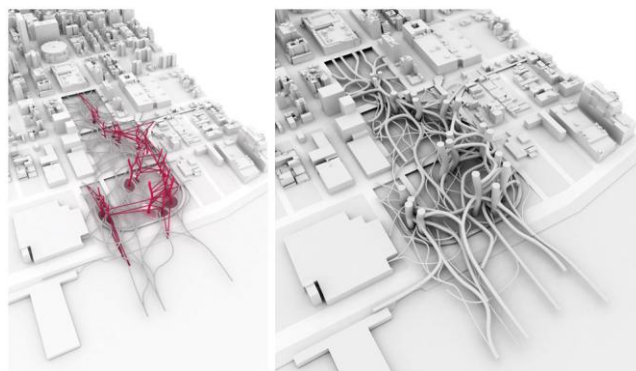
La fonction hair dynamic de Maya, est également utilisée en 3 dimensions pour réaliser les axes verticaux des bâtiments, à partir des îlots sélectionnés, ainsi que les axes horizontaux entre bâtiments.

Fonction Hair-Dynamic de Maya permettant l'optimisation du réseau des circulations selon le principe du moindre détour (Whole-Thread Model)

<sup>rr</sup> <http://www.shampoo.net/>

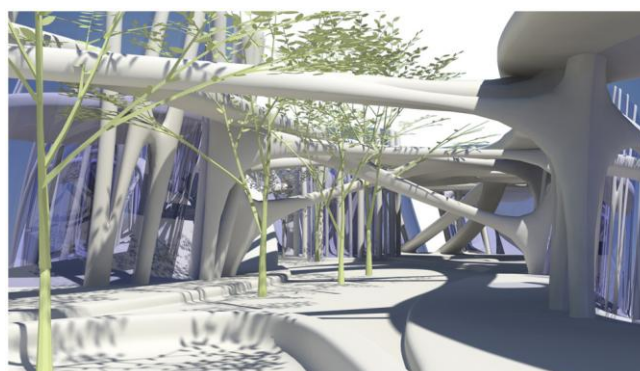
# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

Un modèle de massif de corail a été ensuite appliqué aux rhizomes verticaux représentant les futurs bâtiments, comme exemple d'écosystème adaptatif défini par des relations locales : le principe de croissance du corail étant que le taux de croissance est maximal dans les zones de grande courbure. Cela a permis d'épaissir certains rhizomes à l'emplacement des bâtiments, et d'épaissir leur circonférence aux endroits de courbure maximale, le tout étant validé par une analyse d'optimisation d'effort sous Catia (Dassault Systèmes)<sup>55</sup>.



Enfin la fonction Hair Dynamic de Maya a été utilisé pour générer l'enveloppe des bâtiments, en suivant le premier réseau des lignes de circulation, permettant de créer de vastes espaces vitrés et d'intégrer les différents programmes d'habitations et de commerce au sein des structures ainsi créées (voir Annexe D).

Le résultat est un urbanisme résolument novateur, permettant d'insérer un programme de 5000 logements de 40 à 120 m<sup>2</sup> de haut standing, disposant chacun de balcons, des galeries marchandes aux endroits de plus fort passage, des bureaux et des hôtels, ainsi que de nombreux espaces verts, le tout relié directement à l'Hudson, en partant à l'origine d'un site isolé et d'un terrain discontinu. Une complexité programmatique qui aurait été difficilement résolue avec une approche classique.



<sup>55</sup> <http://www.3ds.com/fr/products/catia/welcome/>



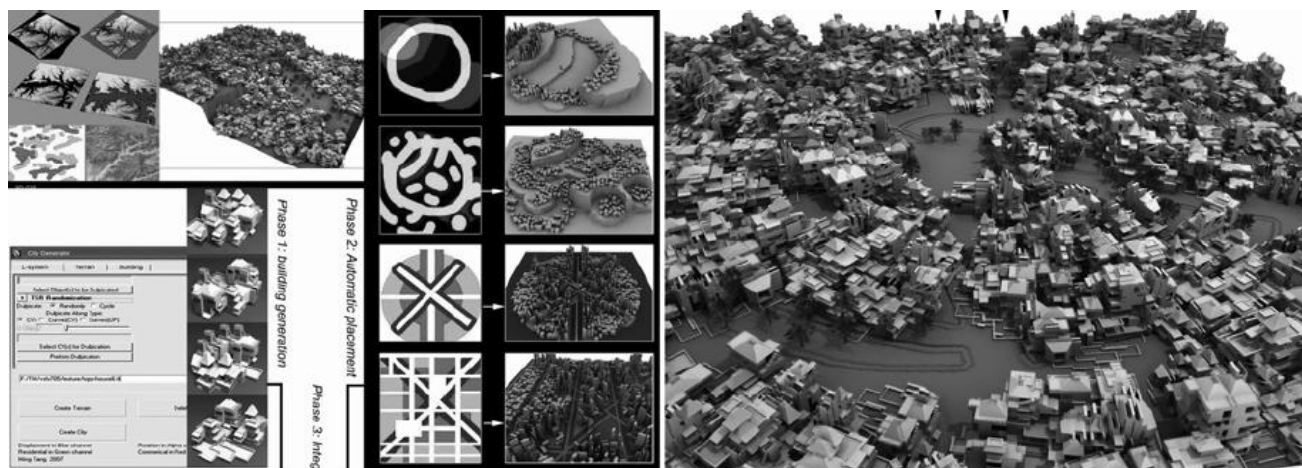
# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

## SWARM CITY ET INFORMATION URBANISM, PAR MING TANG ET JONATHON ANDERSON (2010)

Le professeur Ming Tang de l'école d'architecture et de design d'espace de l'Université de Cincinnati, et Jonathon Anderson, de l'Université de Caroline du Nord Greensboro, soulignent également que « l'intégration de facteurs démographiques, culturels et sociaux dans cette équation contrôlée par ordinateur [le design paramétrique] a été jusqu'à présent négligée. L'écart entre une condition simplifiée dans le processus de design paramétrique et la complexité du contexte urbain dans le monde réel soulève la question du manifeste pour un urbanisme paramétrique »<sup>83</sup>

Ils développent une approche intitulée *Information Urbanism* qui tente de palier cette limitation de l'urbanisme paramétrique en y intégrant des données issues des Systèmes d'Information Géographique, à l'aide de technologies de collecte de données, reconnaissance de formes, visualisation, modélisation spatiale paramétrique et représentation physique.

Leur expérience Swarm City explore comment exploiter des données géo-spatiales diagrammatiques pour construire automatiquement un modèle urbain hautement détaillé pour un jeu vidéo. Ils décrivent leur démarche dans leur article *Information Urbanism : Parametric Urbanism in junction with GIS Data Processing* : « La ville entière a été générée à partir d'un réseau de paramètres. L'objectif est de simuler la forme potentiel du tissu urbain, une « grille humide » décrite par Frei Otto, une ville-diagrammatique qui émerge de modèles sociaux complexes, plutôt que de se soumettre à un plan de grille neutre. Le tissu urbain complexe repose sur la manière dont les paramètres de bâtiments individuels, tels que dimension, pente du toit, ratio fenêtre / murs,...répondent aux caractéristiques du site, tels que abords, végétation et vues. Un outil appelé « City Generator » a été développé à partir de calculs d'évolution générique exploitant des modèles procéduraux et des cartes de SIG. Dans une première phase, City Generator utilise des cartes 2D pour générer [dans une deuxième phase] des modèles d'occupation spatiale (SO) 3D. Ces cartes 2D contiennent les données du SIG, qui reflètent le zonage, la population, les transports et d'autres informations spatiales. Dans la phase finale, à chaque voxel du modèle SO de la phase II est substitué un modèle procédural détaillé de bâtiment ayant survécu à la phase I. La règle de substitution est définie par le designer en fonction de critères de design. Par exemple, une carte des vues est créée en se basant sur les données digitales d'élévation (DEM) du SIG pour contrôler l'emplacement et l'orientation des bâtiments. Une carte des revenus des foyers est utilisée pour contrôler l'application de styles de bâtiments particuliers, tels que hauteur et modénature des façades. Une carte des densités de population est utilisée pour définir l'emplacement des centres d'agglomération et espaces publics. Une carte d'élévations (DEM) est générée pour élever ou abaisser tous les bâtiments en fonction des courbes de niveau. Ces cartes contiennent les informations permettant de contrôler de manière paramétrique la forme de milliers de typologies de bâtiments. « Les expressions sont modifiées et des arrangements spatiaux variés sont produits en fonction des informations entrées dans le système » (Tang, 2007). Ici, le concept d'urbanisme informationnel permet au moteur d'auto-construire la ville en se basant sur de simples règles et logiques. »<sup>84</sup>



Swarm City Project : modèle paramétrique urbain basé sur un système d'information géographique (SIG) – Ming Tang, Jonathon Anderson

Il est particulièrement intéressant de noter que la modélisation urbaine ici rejoint le monde des jeux vidéo, démarche initiée précédemment par le professeur Kas Oosterhuis, de la faculté d'architecture de la Technical University de Delft aux Pays-Bas, avec le moteur de jeu vidéo Virtools de 3dVia, pour son installation MUSCLE exposé à Architectures Non-Standard au Centre Pompidou, en 2003-2004<sup>tt</sup>.

<sup>tt</sup> <http://www.centrepompidou.fr/Pompidou/Manifs.nsf/AllExpositions/7DA19D2CC76BE776C1256D0100510408?OpenDocument&L=1>



---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

## KNFRK, EAST LONDON, PAR INTRAVEIN (2008)

C'est justement dans la lignée des installations paramétriques interactives telles que MUSCLE que s'inscrit un autre projet de thèse du groupe Intravein (Brian Dale, Gerard Joson, Ioannis Orfanos et Pavlos Xanthopoulos), pour leur Master of Architecture (March) au sein du Design Research Lab de l'Architectural Association de Londres.

Ce projet, KNFRK<sup>85</sup>, propose pour le quartier de Stratford dans l'est londonien, adjacent au site olympique de 2012, un réseau urbain intelligent constitué d'un système de clusters de cellules unitaires d'infrastructures et de loisirs, qui embarquent des capacités d'apprentissage comportemental et de réponse. Le concept ici est de passer du design paramétrique à l'interactivité paramétrique avec les usagers.

Ils expliquent leur projet ainsi : « Une série de cellules sont installées le long d'un pont reliant deux pôles commerciaux de Stratford, ainsi qu'au sein d'îlots dans le tissu urbain. Ces cellules sont programmées pour avoir certains comportements, leur permettant de s'adapter à différents usages, en fonction des informations collectées par le système. Les cellules, physiquement séparées, mais connectées d'un point de vue informationnel, forment ainsi, un archipel d'espaces comportementaux.[...] Plutôt que de définir à l'avance les scénarii comportementaux des cellules, le système se nourrit d'une interaction avec les usagers à plusieurs échelles : du niveau de la cellule au niveau de l'archipel urbain, en passant par le niveau des clusters et des îlots, [dans une logique d'assemblages évolutionnistes]. Tous ces éléments sont interconnectés à travers des relations formelles et informationnelles graduelles. »

Plusieurs techniques viennent nourrir leur approche.

Tout d'abord la dynamique des foules, qui permet d'explorer les comportements organisationnels évoluant dans le temps et de générer ainsi des modèles de comportements basés sur divers paramètres (nombre, cohésion, séparation, alignement des directions et vitesses, types et nombre de cibles), dont les valeurs évoluent en fonction des jours/semaines/saisons. Ces paramètres influent sur le comportement des agents à travers des attracteurs. Ces études suggèrent que l'organisation optimale de l'espace varie en fonction du temps. L'équipe Intravein en déduit que les outils paramétriques peuvent réorganiser les caractéristiques spatio-temporelles, de manière qualitative et quantitative.

Les interfaces homme-machine (IHM) jouent également un rôle important dans le projet. Mais les informations ainsi collectées ne permettent pas aux usagers de contrôler directement l'espace et ses fonctionnalités. Elles vont plutôt influencer sur le code-algorithme qui contrôle l'espace. L'espace paramétrique est ainsi managé par une intelligence collective ou plutôt une intelligence des essais, dont les agents ne sont autres que les usagers eux-mêmes. Pour l'équipe Intravein, « l'extension digitale devient un élément à part entière de l'activité urbaine et fusionne avec les expériences spatiales. »

Une des étapes clés du projet est d'articuler la dimension informationnelle à la dimension spatiale, à travers une matrice relationnelle. Les catégories de la matrice croisent des paramètres spatiaux tels que les mouvements de la foule, l'intensité des activités, les usages programmatiques (loisirs, commerce, rencontres) avec des paramètres informationnels pertinents.

Dans une deuxième étape, les usages programmatiques spatiaux ont été codifiés avec des paramètres principaux tels que la surface de l'espace, le mouvement des usagers au sein de l'espace, le niveau sonore de l'espace, le niveau d'usage de l'espace, les facteurs temporels de cet espace, et le potentiel d'interaction avec une interface, ainsi qu'avec des paramètres secondaires mesurant des qualités spatiales, tels que la surface de la zone, sa forme et ses proportions, l'état ouvert, semi-ouvert ou fermé de l'espace, etc... (voir l'axe des abscisses du tableau en Annexe F).

Un système de détection de mouvements couplé à des algorithmes de mécanique des fluides et physique des particules sont utilisés pour simuler les conditions dynamiques de la foule, les trajectoires et attracteurs, en fonction des valeurs du système spatial. Chaque voxel (pixel volumique) du fluide lit les paramètres de ses voisins et ajuste son état en conséquence, permettant ainsi à des variations locales d'être répercutées jusqu'au niveau global à travers des modifications graduelles se déplaçant comme des vagues dans le fluide. Ces variations du champ dynamique de la foule permettent de piloter des actions au niveau des cellules du système, comme par exemple leur ouverture lorsque la densité est maximale.

Le logiciel Catia de Dassault Systèmes<sup>uu</sup> a été utilisé pour modéliser les différents types de cellules, leur cinématique et leur imbrication avec d'autres cellules, dont des cellules d'infrastructure. Chaque type de cellule (planchers, toiture, élément structurel,...) suit des règles spécifiques permettant une gamme de formations cellulaires variées et dynamiques.

Conçu comme un filtre urbain paramétrique, ce réseau urbain de loisirs s'adapterait ainsi en permanence à des scénarii d'usages différents de manière imprévisible, en suivant les dynamiques économiques, sociales et culturelles.<sup>vv</sup>

---

<sup>uu</sup> <http://www.3ds.com/fr/products/catia/welcome/>

<sup>vv</sup> Voir annexe G pour un visuel du réseau urbain paramétrique d'Intravein

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

Associé au flux de données qui traversent aujourd'hui nos villes, mesurent son activité, tracent ses objets, relient ses habitants, et constitue progressivement un véritable système nerveux urbain, cette nouvelle approche laisse envisager des environnements urbains aux comportements intelligents, à partir de règles locales et de systèmes de communication simples.

Il n'y a qu'un pas à franchir pour connecter directement le pouls des citoyens à l'évolution de leur ville, *extensions quasi-organiques d'une conscience et implication collectives nées d'un système nerveux urbain maîtrisé* - pas que des architectes avant-gardistes comme François Roche et Stéphanie Lavaux (R&Sie) franchissent déjà dans leur projet « Une architecture des humeurs », exposé au Laboratoire à Paris (2010)<sup>ww</sup>.

## ENJEUX ACTUELS ET POTENTIELS FUTURS

### UNE PRISE EN COMPTE PLUS AVANCEE DE LA COMPLEXITE DES SYSTEMES SOCIAUX

L'approche de Deleuze, Guattari et DeLanda de la ville comme assemblage social complexe<sup>xx</sup> montre que la ville se crée à partir des interactions répétées entre individus. Or ces individus humains ont un degré de conscience largement supérieur à celui de l'individu « fourmi ». Dès lors, selon DeLanda<sup>86</sup>, pour modéliser le phénomène d'émergence urbaine, les systèmes multi-agents devraient se baser sur des agents beaucoup plus complexes eux-mêmes que les fourmis : des agents décisionnels basés sur des règles de « croyance-désir-intention » (Belief-Desire-Intention Agents).

Des systèmes multi-agents de ce type existent déjà, notamment dans l'industrie du jeu, comme le moteur d'inférence CityEngine de Procedural<sup>yy</sup>. Néanmoins, ces règles, définies dès l'initialisation du jeu, n'évoluent pas. Or nos cerveaux, dit DeLanda, ne sont pas basés sur des règles, mais sur l'activation de réseaux neuronaux. Dès lors, ces agents décisionnels doivent en plus être capables d'apprendre et d'évaluer, en étant a priori également basés sur les réseaux neuronaux.

Ces agents décisionnels doivent par ailleurs être capables d'influencer d'autres agents, et d'évaluer leurs propres décisions, en se basant à la fois sur un régime de croyances et désirs, développé historiquement, et sur les contraintes sociales, institutionnelles et normatives de la société dans laquelle ils évoluent. DeLanda conclue qu'avant de pouvoir modéliser des bâtiments, nous devrions modéliser les processus décisionnels qui les engendrent – ce qui semble encore rester une tâche hors d'atteinte aujourd'hui.

### LE TRAITEMENT DE QUANTITES PHENOMENALES DE DONNEES HETEROGENES

L'urbanisme paramétrique exploite potentiellement une masse considérable de données urbaines, sociales et géographiques, notamment via les SIG. Malgré les progrès importants des vitesses de calcul en informatique, nos capacités de collecte, traitement et croisement de ces données restent limitées, spécialement lorsque le système est sensé calculer en temps réel des populations importantes de solutions possibles.

Han Feng, doctorant au sein du Hyperbody Research Group de la Faculté d'Architecture de la Delft University of Technology, et Yu Zhang, professeure associée en informatique à Trinity University, San Antonio, Texas, tentent de répondre à ce challenge avec une approche logique qu'ils nomment « Computational Urbanism », basée sur le concept de matrice des similarités, permettant de traiter ensemble tous les paramètres d'éléments similaires du tissu urbain.<sup>87</sup>

Il est intéressant de noter que les progrès en vitesse de calcul viendront probablement d'une approche distribuée, massivement parallèle, du traitement de l'information, le *grid computing*, et notamment le réseau mondial d'ordinateurs personnels *World Community Grid*<sup>zz</sup>, qui a déjà démontré son efficacité pour des projets tels que le *Décryphon*<sup>aaa</sup>, pour décrypter le génome humain.

### UNE EVOLUTION INDISPENSABLE DES TECHNIQUES ET TECHNOLOGIES DE CONSTRUCTION

La modélisation paramétrique évolutionniste a jusqu'à présent essentiellement été exploitée comme moteur de recherche de formes optimales dans un environnement donné. Néanmoins, la constructibilité des solutions trouvées ne peut être assurée que lorsque tous les paramètres constructifs sont intégrés à la modélisation : propriétés des matériaux et équipements - dont leur résistance - analyse structurelle du bâtiment, notamment par analyse des éléments finis (FEM). Or actuellement, ces informations et analyses ne sont pas directement intégrées dans les systèmes de design paramétrique, nécessitant le plus souvent d'assurer un contrôle de faisabilité /constructibilité à posteriori, une fois arrivé à un modèle paramétrique satisfaisant sur les autres critères.

---

<sup>ww</sup> <http://lelaboratoire.org/images/archives/archives-9/UneArchitectureDeshumeursDossierdepresseLeLaboratoire.pdf>

<sup>xx</sup> Voir plus haut : *La ville assemblage, symbiose dynamique instable de relations d'extériorité territorialisantes*

<sup>yy</sup> <http://www.procedural.com/cityengine/features/2010.html>

<sup>zz</sup> <http://www.worldcommunitygrid.org/index.jsp>

<sup>aaa</sup> <http://www.decryphon.fr/>

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

D'autre part, même une fois validé d'un point de vue structurel, un projet peut s'avérer extrêmement délicat à construire en phase de chantier, car faisant appel à des expertises issues le plus souvent de l'aéronautique ou de la construction automobile, et que peu d'entreprises générales ou de travaux publics maîtrisent aujourd'hui.

La modélisation semble aujourd'hui être très en avance, voire en rupture, avec les techniques constructives, nécessitant peut-être d'en identifier de nouvelles.

Au-delà du biomimétisme de forme ou de fonction, qui a déjà inspiré de nombreux architectes et ingénieurs dans la conception de bâtiments et structures plus performants<sup>88</sup>, les bio et nanotechnologies pourraient apporter à terme des réponses à ce challenge, en imitant la nature au niveau de ses processus atomiques et moléculaires.

En effet, l'abiogénèse et la biologie synthétique permettent aujourd'hui de créer les premières cellules simples à partir de l'assemblage de molécules. Ces cellules, considérées comme du domaine du non-vivant, démontrent néanmoins un certain nombre de propriétés du vivant telles qu'un métabolisme, une mobilité, des capacités de communication chimique, de réplication et d'évolution. Elles démontrent par ailleurs des comportements collectifs faisant émerger des propriétés émergentes, comme la constitution d'un tissu.

Martin Hanczyc, professeur associé à l'Institut de Physique et de Chimie et au centre Fundamental Living Technology (FLinT) de l'University of Southern Denmark, établit un parallèle entre les protocells et l'architecture : « Il existe une analogie claire entre la biologie synthétique et l'architecture: un système est conçu puis synthétisé de manière ascendante, utilisant des éléments modulaires qui sont assemblés – ou s'auto-assemblent – pour former des structures plus larges, qui à leur tour possèdent des fonctionnalités et formes dérivées de la structure dans son ensemble, et non des éléments constructifs pris indépendamment. »<sup>89</sup>

Selon lui, les protocells peuvent être programmées pour consommer ou produire de manière sélective dans un environnement donné.<sup>90</sup> Il espère qu'un jour, « on arrivera à développer des protocells qui seront capables de s'adapter et de naviguer au sein d'environnements et systèmes du monde réel, des protocells qui, à travers leur chimie embarquée et leur mouvement dynamique, pourront réaliser des fonctions dont l'environnement a besoin, comme par exemple l'accélération chimique de la pétrification des piliers de bois endommagés qui soutiennent de nombreux bâtiments de par le monde. » Et c'est justement à ce projet que s'est attelée Rachel Armstrong, co-directeur du AVATAR Research Group, spécialiste d'architecture et de biologie synthétique, et enseignante à la Bartlett School of Architecture, en un lieu où le pourrissement des pilotis pose un problème crucial : Venise<sup>91</sup>.

La biologie synthétique donne lieu aujourd'hui à des programmes de recherche importants dans le domaine du développement de cellules artificielles programmables, comme par exemple le projet européen PACE (Programmable Artificial Cell Evolution)<sup>bbb</sup> comptant 14 membres internationaux dont le European Center for Living Technology<sup>ccc</sup>, Protolife<sup>ddd</sup> ou encore Protocell Assembly<sup>eee</sup>.

Ce domaine a une portée potentielle importante, en particulier dans le domaine médical, mais également dans le domaine de la construction et du développement durable.<sup>92</sup> Ainsi, des membranes biologiques pourraient totalement redéfinir les niveaux d'interaction entre l'intérieur et l'extérieur d'un habitat, assurant la filtration intelligente de l'air ou de l'eau à échelle moléculaire en supprimant les polluants volatiles et gazeux. La photosynthèse artificielle, abordée plus haut, pourrait apporter directement aux cellules synthétiques des matériaux de construction l'énergie dont ils ont besoin pour leur fonctionnement, voire leur réparation...ou leur évolution. Et en se projetant encore un peu plus loin, la biominéralisation accélérée permet d'imaginer faire pousser, et maintenir chimiquement, des bâtiments et des villes selon les formes inédites et encore virtuelles du design paramétrique.

L'autre piste est celle des nanotechnologies et nanorobots. John Storrs Hall<sup>93</sup>, chercheur à l'Institut de Fabrication Moléculaire de Palo Alto, a développé le concept d'Utility Fog, qui consiste en la fabrication de molécules programmables. Ces molécules pourraient se configurer dans n'importe quelle forme ou substance désirée par simple activation. Ces particules d'Utility Fog ou Foglets sont invisibles, et même respirables, et peuvent donc se matérialiser et se dématérialiser à souhait. Elles constituent le lien ultime entre l'état gazeux et l'état solide.

Hall décrit les Foglets de la manière suivante: « Imaginez un robot microscopique. Il a la taille d'une cellule humaine et douze bras dirigés dans toutes les directions. Une grande quantité de tels robots pourrait former un « crystal-robot » en se tenant par les bras pour former une structure en réseau. Maintenant prenez une pièce, avec des gens, des meubles et d'autres objets – elle reste essentiellement constitué de vide. Remplissez l'air totalement de ces micro-robots. Ils sont appelés Foglets et la substance qu'ils forment Utility Fog (brouillard utilitaire), qui peut avoir de

---

<sup>bbb</sup> <http://134.147.93.66/bmcmyp/Data/PACE/Public/>

<sup>ccc</sup> <http://bruckner.biomiip.rub.de/bmcmyp/Data/ECLT/Public/>

<sup>ddd</sup> <http://www.protolife.net>

<sup>eee</sup> <http://www.protocell.org>

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

nombreuses applications médicales. Et quand un certain nombre de foglets utilitaires se tiennent par la main avec leurs voisins, ils forment un ensemble reconfigurable de matière intelligente. »<sup>fff</sup>

Le saut imaginaire est ici plus radical : tout notre monde matériel deviendrait gazeux et invisible, mais matérialisable à volonté, amenuisant encore un peu plus la frontière entre les modèles virtuels et leur matérialisation.

## UNE APPROCHE PLUS TRANSVERSALE ET COLLABORATIVE DES PROJETS

Le Professeur Kas Oosterhuis (1951), professeur à la faculté d'architecture de la Delft University of Technology, et directeur du Protospace Laboratory for Collaborative Design and Engineering, expert dans le domaine de l'architecture interactive (« digitecture »), souligne l'importance d'une approche transversale dans la conception paramétrique. En effet, la démarche n'est plus en série, où chaque étape fait appel à une expertise différente, l'une après l'autre, mais bien parallèle et systémique, où chaque intervention sur un paramètre du projet, fût-il stylistique, technique, programmatique, économique, ou autre, a une influence directe sur le résultat d'ensemble.

Dès lors, il est fondamental, selon Oosterhuis, que les différents protagonistes du projet, qu'il s'agisse des architectes, des ingénieurs structures, des architectes d'intérieur, de l'économiste, du promoteur, du maître d'ouvrage ou de son AMO, voire des usagers eux-mêmes (voir plus loin : vers un urbanisme paramétrique participatif), puissent travailler ensemble, de manière collaborative et en temps réel, sur la conception du bâtiment, du quartier ou d'un simple objet. De cette manière, chacun peut réagir immédiatement à toute intervention d'un autre protagoniste, à la manière même d'un essaim, remarque Oosterhuis, et les interactions résultantes font progressivement émerger la forme du projet.

Oosterhuis décrit son approche de la manière suivante : « Chaque acteur a sa vue spécifique sur les données du modèle. [...] Chacun d'eux envoie des signaux au modèle, qui les reçoit, les traite et agit en conséquence. Le modèle reçoit d'autres classes/types de données des autres métiers conduisant à un ajustement du modèle pour des raisons complètement différentes. Dès lors, cela mène à un processus de Design et Ingénierie Collaborative. Tous les acteurs dans ce processus – gens, matériaux, forces, algorithmes, argent, énergie – sont à leur manière connectés à l'évolution du modèle 3D. Chacun d'eux assurant certaines règles simples sans être conscients de ce que les autres acteurs font ou sont capables de faire. En ce sens, même un processus de construction classique se comporte comme un essaim. [...] En tant qu'humains, nous devons apprendre à interagir avec les processus de calcul dynamiques et hyper rapides que nous offre l'informatique. Enfin, nous devons construire les outils de Design et d'Ingénierie Collaborative. En effet, l'un des enjeux est de parvenir à effectuer la conception du bâtiment de manière collaborative, avec d'autres disciplines (construction, écologie, économie) ainsi qu'avec le client. »<sup>94</sup>

Oosterhuis a mis en pratique son approche théorique au sein du Hyperbody Research Group à la Delft University of Technology en développant un espace physique de design et d'ingénierie collaboratifs : le Protospace, qui en est aujourd'hui à sa version 3.<sup>ggg</sup> Sorte de War-Room digne du film *Minority Report* (Steven Spielberg, 2002), le Protospace, selon Oosterhuis, permet à différents "joueurs" d'être « impliqués dans l'évolution du modèle 3D (styliste, ingénieur construction, écologiste, économiste, touriste) et d'avoir chacun leur propre vue sur ce modèle : le styliste voit une surface qui peut être modelée, l'ingénieur construction des nœuds et connecteurs, l'écologiste des surfaces séparant différents microclimats, l'économiste des nombres et feuilles de calcul, et le touriste navigue dans le modèle tel qu'il apparaîtra visuellement dans son contexte. Chaque joueur voit des choses différentes d'une même réalité. Comme les oiseaux d'un essaim, les experts de Protospace se regardent les uns les autres et s'ajustent aux décisions des autres. Le principal enjeu de la construction d'outils de design et d'ingénierie collaborative est de développer le modèle 3D à travers les inputs spécialisés des différentes disciplines de manière synchronisée. Le but principal de Protospace est d'améliorer la qualité et la vitesse du processus créatif, à partir du traitement parallèle des différentes connaissances de toutes les disciplines impliquées dès la première étape du design. Les différents joueurs ont immédiatement conscience des changements effectués par les autres joueurs et c'est au groupe (« troupeau ») tout entier de décider de valider ou non l'évolution du modèle. Aucune discipline ne prend le leadership.»<sup>95</sup> Avec le Protospace, Oosterhuis nous fait rentrer dans le design paramétrique collaboratif et temps réel.

## UN CHANGEMENT PROFOND DU ROLE DU MAITRE D'ŒUVRE

Oosterhuis montre bien le changement radical apporté par le design paramétrique dans la démarche de conception architecturale et urbaine : « Le design d'un bâtiment consiste donc alors à lancer le calcul, génération après génération, le vérifier, le modifier, et relancer le calcul. Au vu de la rapidité des itérations permise par les puissances de calcul actuelles et futures, le design d'un bâtiment devient un processus interactif en temps réel avec le modèle 3D simulé par la succession des générations d'un essaim d'éléments constitutifs. »<sup>96</sup>

---

<sup>fff</sup> <http://www.imm.org>

<sup>ggg</sup> <http://www.bk.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=3fbfb723-8449-44eb-8210-fd199f6c08cc&lang=en> (la version 4 est à ce jour en cours de développement)

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

Dans cette nouvelle approche de l'architecture, le design d'un bâtiment ou d'un quartier n'est plus l'acte de création solitaire, voire la « signature », de l'architecte, mais plutôt la conception de conditions micro-environnementales au sein d'un macro-environnement émergent. L'architecte n'est plus maître de la forme, mais fidèle traducteur des contraintes, conditions et objectifs du futur projet, dont la forme sera générée pour s'y adapter de manière optimale.

Et lorsque le système paramétrique devient distribué et interactif, comme dans le projet d'Intravein, Nicholas Negroponte (1943), fondateur du Medialab du MIT en 1985 dont il est le directeur, spécialiste des interfaces homme-machine et fondateur de la revue Wired, va jusqu'à écrire que le système: « exclue l'architecte du processus de conception en donnant à l'environnement la capacité de se designer lui-même et d'avoir une existence autogénétique [...] il s'agit d'une architecture sans architecte (et même sans architecte auxiliaire) »<sup>97</sup>

La perte de contrôle sur la forme du bâtiment pose un problème sérieux à nombre d'architectes dont l'espace, la forme, les formes, sont le cœur de la culture et de la pratique. Mais cette perte de contrôle est à relativiser pour trois raisons.

Tout d'abord, le designer, ou plus précisément l'équipe de concepteurs, garde la main sur l'ensemble des paramètres, leurs poids respectifs dans le modèle, ainsi que les règles d'interaction locales. Ainsi, un paramètre de « vues dégagées » peut être maximisé, ou un autre paramètre de « hauteur de bâtiment » minimisé. Les modifications des paramètres influenceront directement sur les formes résultantes.

D'autre part, l'équipe de concepteurs peut à tout moment intervenir dans un processus de recherche évolutionniste de forme (principe de l'Interactive Evolutionary Computation – IEC), pour influencer sur l'évolution des populations de bâtiments, quartiers ou villes générés, que ce soit en modifiant les paramètres en cours de route ou en modifiant les critères d'adaptation (fitness function).

Enfin, il faut plutôt considérer les outils et méthodes de design paramétrique comme un nouvel outil *précisément* au service de la recherche de formes, dans des situations où la complexité du projet (site, programme, parties prenantes, techniques constructives,...) ne permettrait pas d'identifier des solutions optimales de manière classique.

Pour Oosterhuis: « Cette prise de conscience transforme les designers en chercheurs : ils doivent concevoir et exécuter des systèmes pour trouver le système le plus adapté, c'est de la performance architecturale (performative architecture) plaçant l'architecte, comme l'artiste, au centre génétique de tout ce qui a été généré autour de nous [et tout ce qui pourra l'être]. » Une sorte d'écologue-biologiste-généticien de bâtiments et villes vivantes...

Gordon Pask (1928 – 1996), cybernéticien et psychologue anglais, anticipa cette évolution juste avant sa mort à la lecture de l'ouvrage de John Frazer, *An Evolutionary Architecture*<sup>98</sup>, dont il a écrit la préface: « Le rôle de l'architecte ici, je pense, n'est pas tant de concevoir des bâtiments et des villes, mais de les catalyser : d'agir pour leur permettre d'évoluer »

## VERS UN URBANISME PARAMETRIQUE PARTICIPATIF ?

La figure Brunelleschienne de l'architecte ou de l'urbaniste s'effacerait donc au profit d'une équipe pluridisciplinaire et transversale de conception exploitant des outils de recherche de formes urbaines et architecturales. Les projets SwarmCity, de Tang et Anderson, KNFRK d'Intravein, ou encore « une architecture des humeurs » de R&Sie, vont un peu plus loin encore, en se connectant directement aux phénomènes sociaux urbains, à travers les masses de données les décrivant ou des interfaces d'interaction, pour générer automatiquement des formes spatiales adaptatives.

On touche ici du doigt ce que pourrait être un urbanisme participatif, qui selon Yves Chalas, professeur à l'Institut d'Urbanisme de Grenoble, est :

- un urbanisme non-spatialiste, c'est-à-dire considérant que « la forme construite n'est qu'un élément parmi d'autres du bien-vivre dans la cité »<sup>99</sup>,
- un urbanisme performatif, c'est-à-dire partant du débat public pour co-concevoir le projet urbain de manière collaborative et itérative, au-delà des « logiques duelles du type offre/demande, question/réponse, problème/solution, ou encore conception/usage, commande/projet, expertise/décision »<sup>99</sup>
- un urbanisme intégrateur, prônant une « collaboration plurielle » permettant seule de recomposer la complexité urbaine que nul individu et nulle institution ne peuvent appréhender seuls,
- un urbanisme apophatique, recherchant non pas le bonheur pour tous, comme les logiques autoritaristes de l'urbanisme spatialiste, mais le moindre mal pour chacun - faisant ainsi de chacun une pièce essentielle à l'établissement de ce moindre mal pour tous.
- Un urbanisme politique, « en tant qu'appel à l'invention ou à la réinvention de la cité par elle-même », dans une logique renvoyant à « moins de transcendance et à plus d'immanence ».<sup>99</sup>



---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

La modélisation paramétrique évolutionniste de notre espace urbain pourrait nous permettre de faire émerger des projets de villes résultant directement d'une implication participative des citoyens, des projets où la forme ne serait pas déterminée à l'avance par des « sachants spatialistes », mais résulterait d'un équilibre dynamique et démocratique entre les parties prenantes de la cité, et feraient des citoyens les nouveaux concepteurs de notre environnement construit - et des architectes et urbanistes des « conseillers en écologie », littéralement, « conseiller en science de la maison », comme le prônait déjà, dans les années 70, Yona Friedman, délaissant ainsi l'image du maître d'œuvre tout puissant, pour passer à celui du véritable conseiller, à l'écoute tant des usagers que de l'environnement.

## **CONCLUSION**

La ville serait donc un méta-organisme émergeant par assemblages successifs des multiples interactions humaines et organisationnelles, depuis le niveau du trottoir jusqu'au niveau des territoires, bénéficiant selon une loi de puissance de ces effets d'interaction et d'agglomération qui entretiennent sa croissance et son développement économique dans une boucle de rétroaction positive...jusqu'à ce qu'un élément clé de son métabolisme ne vienne à lui manquer - événement que l'on peut maintenant envisager à assez courte échéance avec la fin des réserves de pétrole à l'horizon 2060 ou à une catastrophe climatique dans le courant du siècle.

On comprend mieux dès lors pourquoi les différentes politiques interventionnistes et planificatrices centralisées et descendantes n'ont que si peu d'effets face à la loi ascendante et distribuée des intérêts particuliers de milliards d'individus et des millions d'entreprises et organisations peuplant notre planète.

Dans cette logique d'auto-organisation du système complexe urbain, des propriétés positives au niveau micro-économique, ou considérées comme telles, comme l'enrichissement personnel, les loisirs ou la culture, peuvent faire émerger des propriétés positives au niveau global, comme l'accroissement des richesses, le développement de l'innovation ou la diffusion de l'éducation et de la culture - mais également des propriétés négatives, comme les inégalités croissantes ou l'atteinte à l'équilibre de la biosphère.

La théorie des systèmes complexes nous enseigne que seules deux phénomènes peuvent modifier la dynamique du système urbain : soit une rupture dans l'environnement (fin des hydrocarbures, changement climatique, catastrophes naturelles,...), soit une modification des lois d'interaction locales.

Si nous voulons encore éviter un « changement de phase » de ce système qui pourrait signer sa mort, seule une modification des lois d'interaction locale est à notre portée. Or ces lois d'interaction locale sont génétiquement codées dans le fonctionnement du développement urbain au niveau du comportement des individus et organisations : il s'agit pour l'individu des lois d'intérêt personnel, telles que la pyramide de Maslow (1908 – 1970), professeur de psychologie américain, peut en donner par exemple une interprétation (voire Annexe A), et des lois de marché économiques et financières de maximisation de la valeur boursière pour les entreprises.

Nous disposons aujourd'hui pour la première fois dans l'histoire de l'humanité du cadre conceptuel et des outils et technologies de modélisation pour rechercher, simuler et représenter ces nouveaux modèles urbains, nous permettant d'identifier quels « gènes » modifier ou remplacer pour parvenir à cette symbiose entre nos sociétés humaines et notre biosphère.

Ce génotype d'un nouveau monde est peut-être déjà là pour les entreprises, dans les premières expériences de symbiose industrielle de Kalundborg au Danemark<sup>hhh</sup>, les théories de Cradle-to-Cradle de McDonough et Braungart<sup>iii</sup>, le capitalisme naturel de Paul Hawken, Amroy et L. Hunter Lovins<sup>jjj</sup>,...et également au sein d'une toute petite portion de la population mondiale sensibilisée à l'écologie et modifiant ne serait-ce que légèrement son comportement en faveur de la planète, avec le mouvement des villes en transition fondé par Rob Hopkins<sup>kkk</sup>, le mouvement Slow Food<sup>lll</sup>, les associations pour le maintien d'une agriculture paysanne (AMAP), et plus globalement le courant de pensée « décroissant » et le localisme défendus par Serge Latouche.<sup>mmm</sup>

La clé sera de rendre progressivement préférable des choix allant dans le sens d'une société humaine compatible avec son hôte terrestre dans les trillions de décisions prises chaque minute, pour que dans un effet papillon, nous parvenions in fine à faire muter la ville, d'un organisme viral détruisant la planète à un organisme symbiotique, profitant à la biosphère.

---

<sup>hhh</sup> <http://www.symbiosis.dk/>

<sup>iii</sup> [http://www.mcdonough.com/cradle\\_to\\_cradle.htm](http://www.mcdonough.com/cradle_to_cradle.htm)

<sup>jjj</sup> <http://www.natcap.org/>

<sup>kkk</sup> <http://villesentransition.net/>

<sup>lll</sup> <http://www.slowfood.fr/>

<sup>mmm</sup> <http://www.monde-diplomatique.fr/2003/11/LATOUCHE/10651>

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

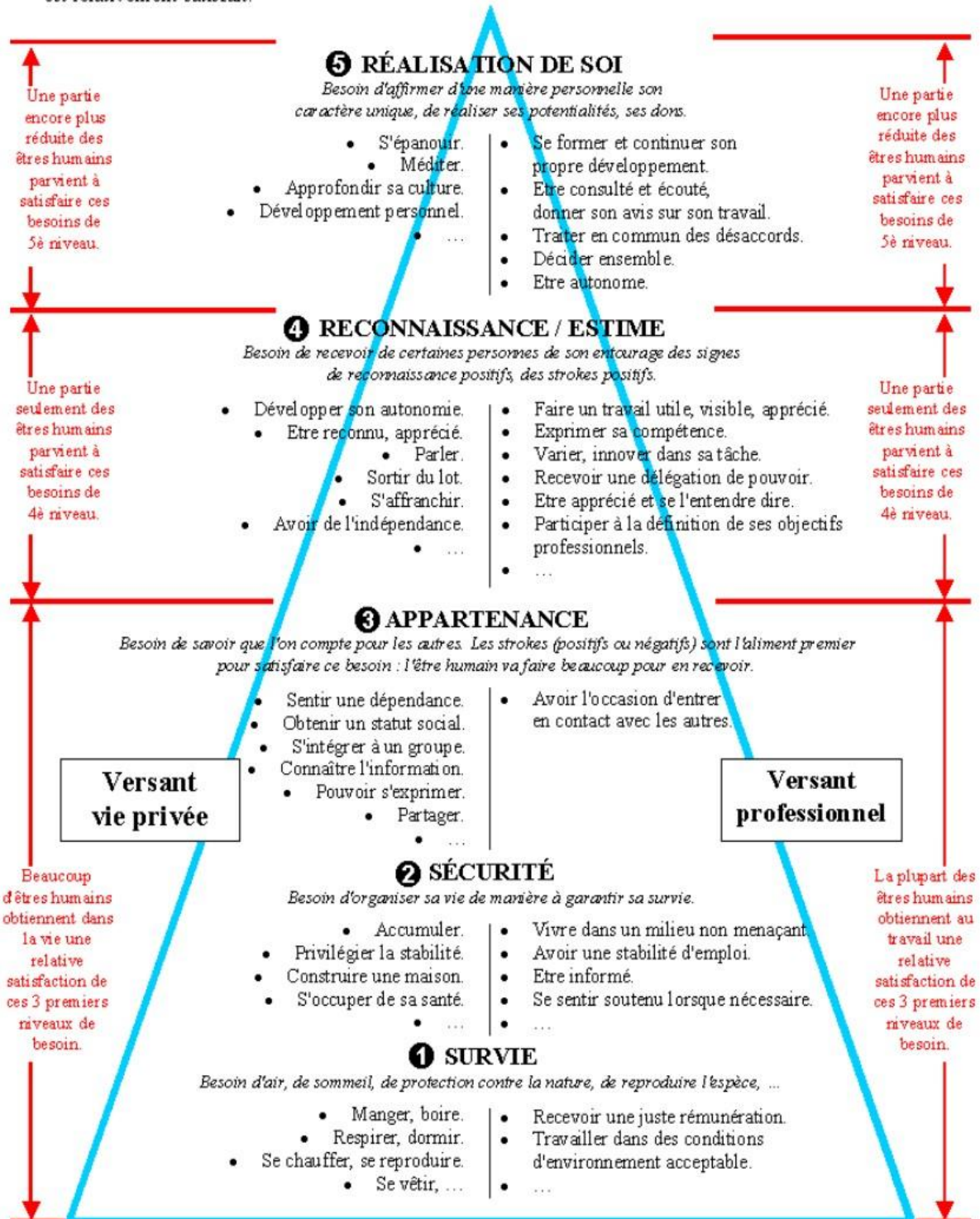
## ANNEXES

### ANNEXE A : LA PYRAMIDE DES BESOINS DE MASLOW

Time Management  
Pyramide des besoins de Maslow

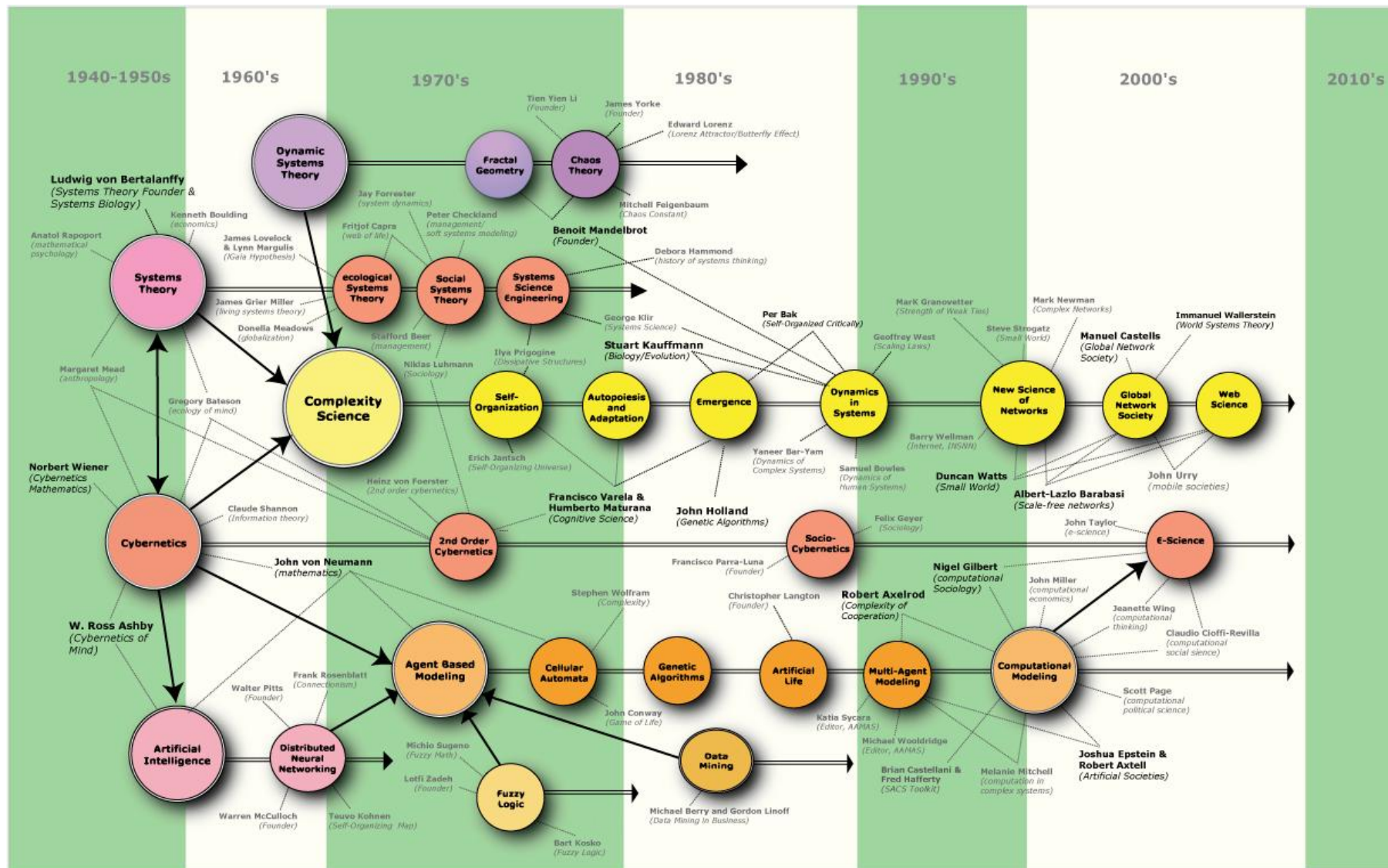
Besoins propres au monde occidental.

1. pyramide particulièrement intéressante pour le monde du travail
2. les humains ne ressentent l'apparition d'un besoin supérieur que lorsque le besoin actuel est relativement satisfait.



# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

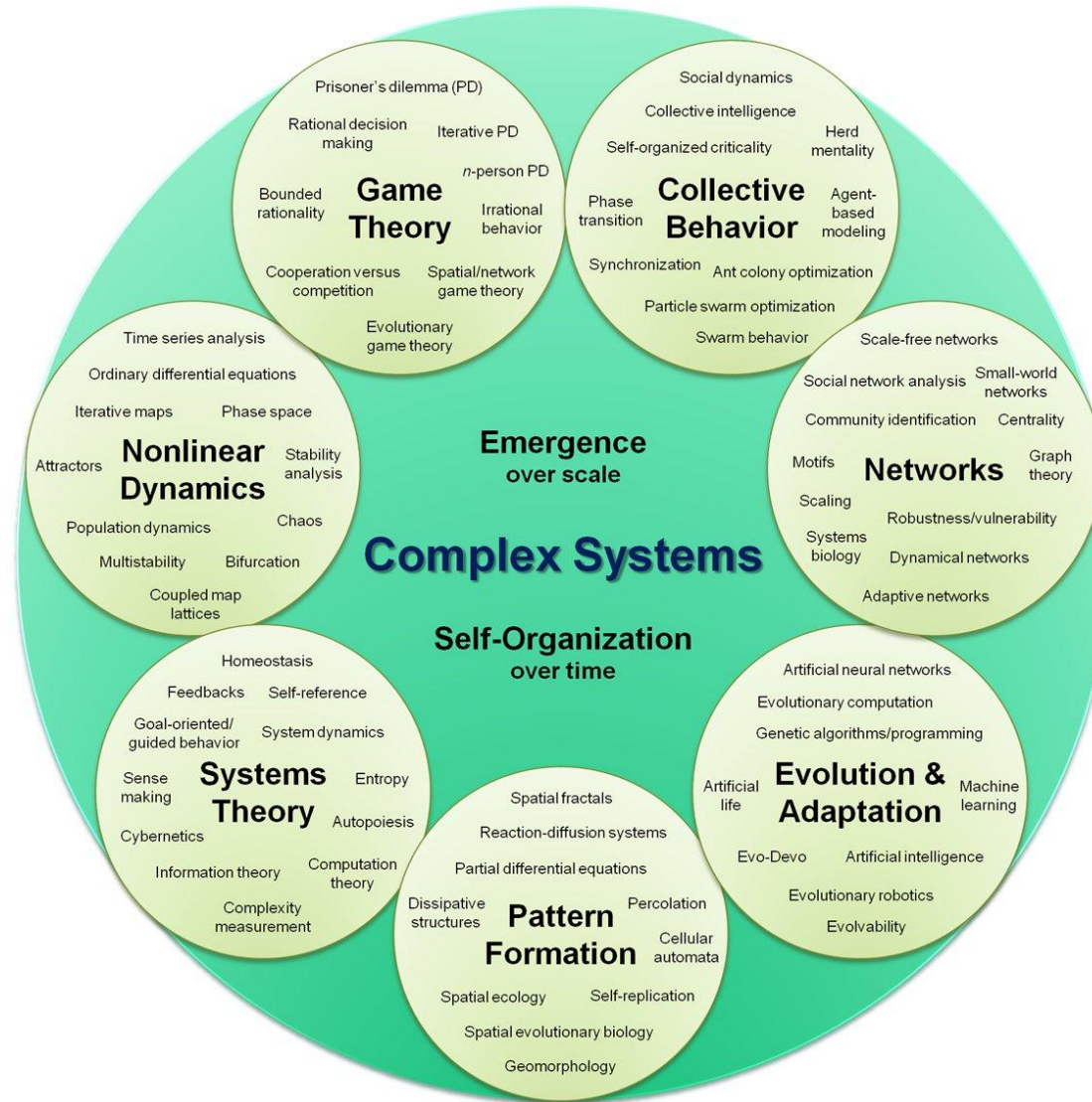
## ANNEXE B : SCHEMA D'EVOLUTION DES SCIENCES DES SYSTEMES COMPLEXES



Source : Brian Castellani, professeur de sociologie, Kent State University, Kent Ohio. [Sociology and Complexity Science Website](http://www.sociologyandcomplexity.com)



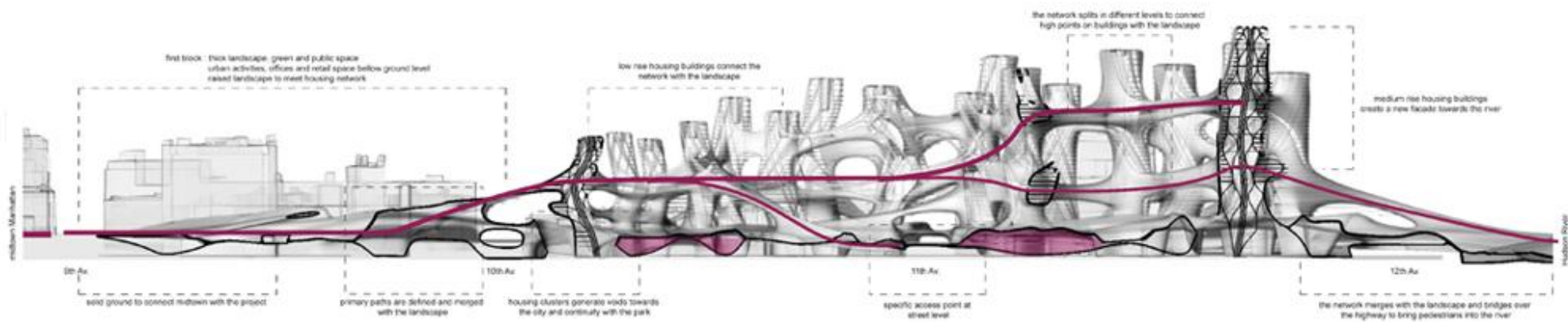
## ANNEXE C : CARTE DES PRINCIPAUX CONCEPTS DES SYSTEMES COMPLEXES



Source : Hiroki Sayama, D.Sc., Collective Dynamics of Complex Systems (CoCo) Research Group at Binghamton University, State University of New York – Novembre 2010

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

## ANNEXE D : URBAN REEF, VUE D'ENSEMBLE ET ELEVATION



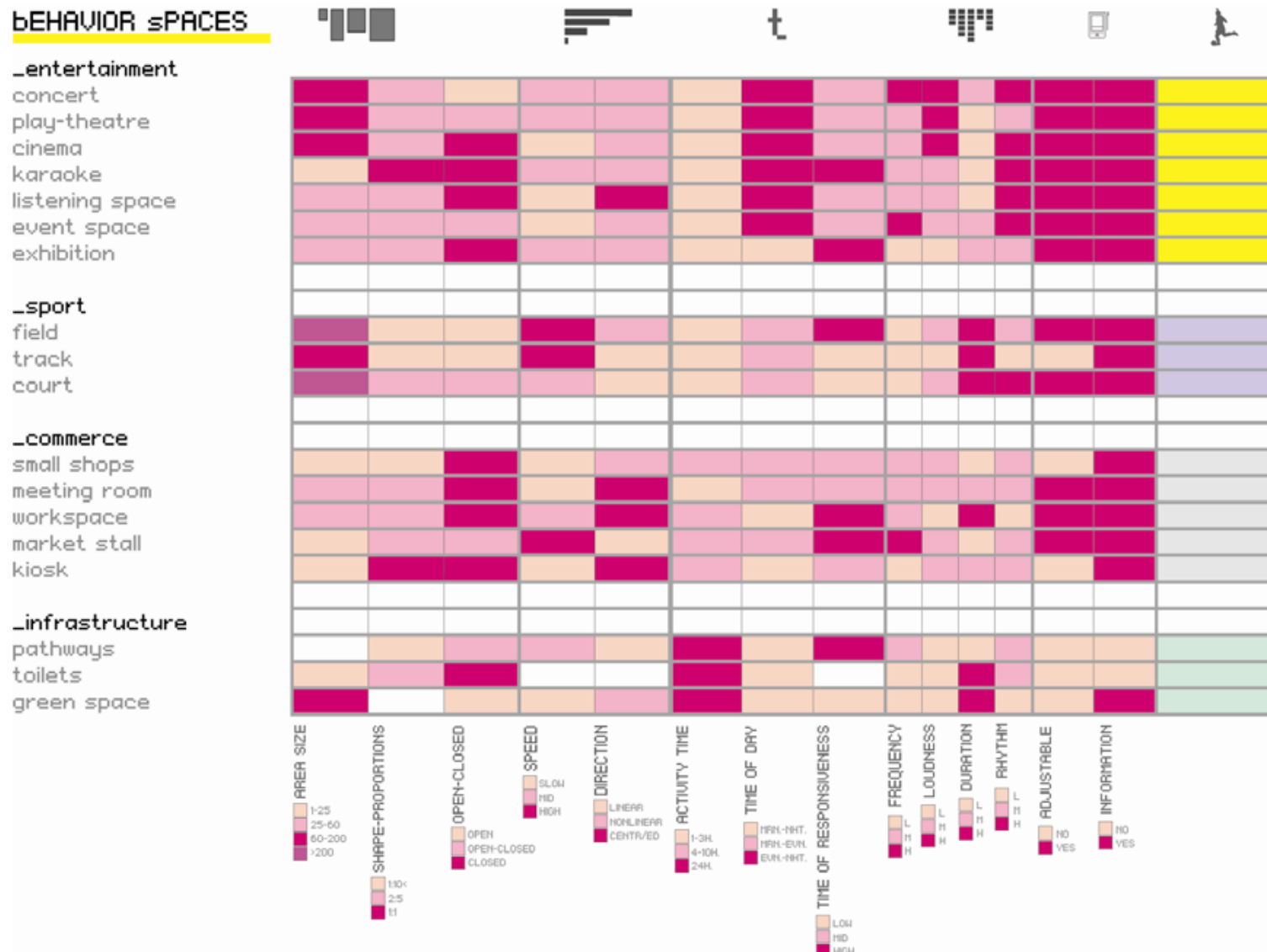
Equipe Shampoo, Design Research Lab, Architectural Association, Londres, 2009





# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

ANNEXE F : MATRICE DES RELATIONS SPATIALES ET FONCTIONNELLES DU RESEAU URBAIN INTERACTIF KNFRK



Auteurs: AADRL March Thesis. Credit: Team – Intravein (Brian Dale, Gerard Joson, Ioannis Orfanos, Pavlos Xanthopoulos)

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

ANNEXE G: RESEAU URBAIN PARAMETRIQUE EVOLUE KNFRK DE STRATFORD



Auteurs: AADRL March Thesis. Credit: Team – Intravein (Brian Dale, Gerard Joson, Ioannis Orfanos, Pavlos Xanthopoulos)

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

## **BIOGRAPHIE DE L'AUTEUR**

Diplômé d'ESCP Europe (1992), où il a suivi en parallèle un Master of Business Studies en Stratégie et Organisation à University College Dublin, diplômé d'un DESS en Gestion des Nouveaux Médias à l'Université Paris-Dauphine (DESS 226, 1993), Olivier Scheffer a commencé sa carrière comme chercheur au département recherche et prospective de l'INA sur les nouveaux réseaux de communication multimedia (1993), puis a travaillé quinze ans dans la création et le développement d'entreprises innovantes dans le domaine des technologies de l'information, et notamment dans l'Internet, où il est l'un des pionniers en France du concept de communauté virtuelle (montagne.com / 1995).

Après avoir créé et développé la filiale française du leader scandinave de l'hébergement d'applications internet (active isp / 1998-2000), puis une autre société spécialisée dans l'agrégation d'actualités en ligne (portapps / 2000-2003), Olivier a rejoint Digimind, éditeur de plateformes de veille collaborative sur Internet devenu leader en France, où il a monté le département et l'activité marketing (2003 – 2009). Il est intervenu en particulier dans la conception et la mise en place de dispositifs de veille informationnelle et d'intelligence collaborative pour des entreprises telles que GSK, Schneider Electric, Société Générale, Unilever, Bouygues Telecoms, LVMH, BNP Paribas, Crédit Agricole, Microsoft, SFR, EDF, Décathlon, MAIF, Bayer, ou les laboratoires ROCHE.

En parallèle de sa passion pour les sciences, l'innovation, et les technologies de l'information, Olivier s'est intéressé très tôt à l'architecture et l'urbanisme, à travers revues, expositions, conférences, visites, voyages, puis plus récemment cours du soir en histoire de l'architecture (Cité de l'Architecture et du Patrimoine), avant d'opter pour une année à temps plein en architecture intérieure à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts Décoratifs (2009-2010).

Très sensibilisé à la nature et à l'écologie – et à l'impact des activités humaines sur notre biosphère - Olivier a souhaité mettre à profit sa triple compétence en développement de projets innovants, en technologies de l'information et en architecture, au service d'un projet de recherche sur les nouvelles approches de conception de villes durables, qu'il développe au sein du Mastère Spécialisé Création et Technologie Contemporaine de l'ENSCI (2010-2011), en partenariat avec l'agence d'architecture et d'urbanisme X-TU<sup>lxvi</sup> (Anouk Legendre, Nicolas Desmazières), et sous la direction de projet d'Antonella Tufano, architecte et urbaniste (diplôme italien), Docteur en « science du langage : arts et littératures » (EHESS), maître-assistante vacataire à l'ENSA Paris-La Villette, et membre du laboratoire GERPHAU<sup>lxvii</sup>, où elle mène un programme de recherche sur la ville durable.

---

<sup>lxvi</sup> [www.x-tu.com](http://www.x-tu.com)

<sup>lxvii</sup> entité du laboratoire LAVUE (Laboratoire Architecture Ville Urbanisme Environnement), UMR 7218 du CNRS, regroupant l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris la Villette, l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Clermont-Ferrand (antenne 1), l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier Languedoc Roussillon (antenne 2) - <http://www.gerphau.archi.fr>

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

## RÉFÉRENCES

---

- <sup>1</sup> Olivier Scheffer, Hyper-urbanisation : la marée grise, éditions Symbiopolis, novembre 2010 – [www.symbiopolis.org](http://www.symbiopolis.org)
- <sup>2</sup> Changements climatiques 2007 – Rapport de Synthèse – Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat – PNUÉ – OMM - ONU
- <sup>3</sup> Olivier Scheffer, l'architecture durable: des sources vernaculaires à BedZed, éditions Symbiopolis, janvier 2011 – [www.symbiopolis.org](http://www.symbiopolis.org)
- <sup>4</sup> Nations Unies – World Urbanization Prospect, The 2009 Revision
- <sup>5</sup> « Civilisation matérielle, économie et capitalisme – XVe – XVIIIe siècle » - Fernand Braudel - Armand Colin - 1979
- <sup>6</sup> Olivier Dollfus, *La mondialisation*, Presses de Sciences Po, 1996, p. 25-27, chapitre 2, « Le monde dans ses lieux ».
- <sup>7</sup> UN-HABITAT –Global Urban Indicators database - <http://www.unhabitat.org/stats/Default.aspx>
- <sup>8</sup> Urban Sprawl in Europe, The Ignored Challenge – European Environment Agency - 2006
- <sup>9</sup> RéférenceS – juin 2010 – L’environnement en France – Commissariat général au développement durable, Service de l’observation et des statistiques, Ministère de l’Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
- <sup>10</sup> State of the World's Cities 2010/2011 - Cities for All: Bridging the Urban Divide – ONU Habitat 2010 <http://www.unhabitat.org/pmss/listItemDetails.aspx?publicationID=2917>
- <sup>11</sup> « Les tendances de l’urbanisation : l’étalement urbain constitue désormais un problème mondial » - UN Habitat – State of the World’s Cities 2010/2011 – Bridging the urban divide - <http://www.unhabitat.org/documents/SOWC10/FR/R4.pdf>
- <sup>12</sup> HUOT Jean-Louis, Les premiers villageois de Mésopotamie. Du village à la ville, Armand Colin, Paris, 1994.
- <sup>13</sup> Villes, marchés et marchands au Moyen-Âge, Henri Pirenne, in *Revue Historique*, Tome LXVII, p.59-70, 1898
- <sup>14</sup> La révolution démographique - Études et essais sur les problèmes de la population, Paris, INED-Presses Universitaires de France
- <sup>15</sup> Audriac, Ivonne, 2005. Information technology and urban form: Challenges to smart growth. *International Regional Science Review* 28(2).
- <sup>16</sup> « Enjeux climatiques urbains », Claude Kergomard, le 29 novembre 2010 - Cycle de conférences sur le climat 2010 – 2011 organisé par le CERES-ERTI/GIS-CES à l’ENS, Paris
- <sup>17</sup> Handy, S., 2005. Smart growth and the transportation-lad use connection: What does the research tell us? *International Regional Science Review* 28(2)
- <sup>18</sup> Robert Putnam, *Bowling Alone: The Collapse and Revival of American Community* (2000, ISBN 0-7432-0304-6)
- <sup>19</sup> “The Rise of the Creative Class: And How It’s Transforming Work, Leisure, Community and Everyday Life” – Richard Florida – Perseus Books Group – juin 2002
- <sup>20</sup> Julien Damon, Avenir et attractivité des villes, 31 mars 2010, Vinci – Fabrique de la Cité
- <sup>21</sup> Julien Damon, Enseignements de l’étude sur l’attractivité des villes, 6, 7 et 8 avril 2010, Hambourg
- <sup>22</sup> Thompson D’Arcy W. *On Growth and Form* (abridged edition), Cambridge University Press 1962. (première publication en 1917)
- <sup>23</sup> Claude E. Shannon: A Mathematical Theory of Communication, *Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, 1948, <http://bstj.bell-labs.com/BSTJ/images/Vol27/bstj27-3-379.pdf> - suivi de l’ouvrage écrit avec Warren Weaver un an plus tard: Claude E. Shannon and Warren Weaver: *The Mathematical Theory of Communication*. The University of Illinois Press, Urbana, Illinois, 1949. ISBN 0-252-72548-4
- <sup>24</sup> Rapport basé sur un article publié en 1948 : Science and Complexity, Warren Weaver, *American Scientist* 36 :536, 1948 - <http://people.physics.anu.edu.au/~tas110/Teaching/Lectures/L1/Material/WEAVER1947.pdf>
- <sup>25</sup> Konstantin S. Merezhkovsky, *Theory of two Plasmas as the Basis of Symbiogenesis, A New Study on the Origin of Organisms* (en russe, Kazan, 1909); Boris M. Kozo-Polyansky, *A New Principle of Biology: Essay on the Theory of Symbiogenesis* (en russe, Moscou, 1924). La théorie est décrite en anglais dans Liya N. Khakhina's *Concepts of Symbiogenesis: A Historical and Critical Study of the Research of Russian Botanists* (en russe, Moscou, 1979) traduit en anglais par Stephanie Merkel et édité par Lynn Margulis et Mark McMenamin (New Haven: Yale University Press, 1992). Extrait de : *DARWIN AMONG THE MACHINES; OR, THE ORIGINS OF [ARTIFICIAL] LIFE, A Presentation* By George Dyson, 2005 - <http://informatics.indiana.edu/larry/al4ai/extras/DysonG.DarwinMachines.pdf>
- <sup>26</sup> Thompson D’Arcy W. *On Growth and Form* (abridged edition), Cambridge University Press 1962. (première publication en 1917)
- <sup>27</sup> Turing, A. M. (1952). "The Chemical Basis of Morphogenesis". *Philosophical Transactions of The Royal Society of London*, series B 237: 37–72.



---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

---

- <sup>28</sup> Keller, E. F.; Segel, L. A.. "Initiation of slime mold aggregation viewed as an instability". J. Theor. Biol. 26: 399. - <http://dx.doi.org/10.1016%2F0022-5193%2870%2990092-5>
- <sup>29</sup> The Death and Life of Great American Cities, Jane Jacobs (1961) New York: Random House. ISBN 0-679-60047-7
- <sup>30</sup> Steven Johnson, *Emergence : the connected lives of ants, brains, cities and software*, page 91, penguin books, 2001
- <sup>31</sup> Schelling, T. (1969). Models of segregation. The American Economic Review, 59(2), 488-493. Voir aussi du meme auteur: *Micromotives and Macrobehaviour*, New York: Norton, 1978, Ch. 4.
- <sup>32</sup> James E. Vance Jr., *The Continuing City. Urban Morphology in Western Civilization – Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 1990, p. 36-37*
- <sup>33</sup> Steven Johnson, *Emergence : the connected lives of ants, brains, cities and software*, page 91, penguin books, 2001
- <sup>34</sup> Prigogine, Ilya; Nicolis, G. (1977). *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*. Wiley. ISBN [0471024015](https://doi.org/10.1002/9780471024015)
- <sup>35</sup> A Physicist Solves the City, Jonah Lehrer, New York Times, 17 décembre 2010 - [http://www.nytimes.com/2010/12/19/magazine/19Urban\\_West-t.html?hpw=&pagewanted=all](http://www.nytimes.com/2010/12/19/magazine/19Urban_West-t.html?hpw=&pagewanted=all)
- <sup>36</sup> Gilles Deleuze et Félix Guattari, *Rhizome*, 1976, et *Mille Plateaux*, 1980, Editions de Minuit
- <sup>37</sup> Manuel DeLanda, *A New Philosophy of Society, Assemblage Theory and Social Complexity*, 2006, Continuum, New York
- <sup>38</sup> Gilles Deleuze et Claire Parnet, *Dialogues II*, 2002, Columbia University Press, New York
- <sup>39</sup> Fernand Braudel, *Civilisation matérielle, économie et capitalisme (XVe-XVIIIe siècles)*, Paris, Armand Colin, 3 volumes, 1979
- <sup>40</sup> Manuel DeLanda, *A New Philosophy of Society, Assemblage Theory and Social Complexity*, 2006, Continuum, New York chapitre 5, *Cities and Nations*, pp 94-119
- <sup>41</sup> James E ; Vance Jr, *The continuing City. Urban Morphology in Western Civilization*, Johns Hopkins University Press, 1990, p 316
- <sup>42</sup> Luís M. A. Bettencourt<sup>1,2</sup>, José Lobo<sup>3</sup>, Deborah Strumsky<sup>4</sup>, Geoffrey B. West<sup>1,2</sup> - Urban Scaling and Its Deviations: Revealing the Structure of Wealth, Innovation and Crime across Cities - <sup>1</sup>Theoretical Division and Center for Nonlinear Studies (CNLS), Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, United States of America, <sup>2</sup>Santa Fe Institute, Santa Fe, New Mexico, United States of America, <sup>3</sup>School of Human Evolution and Social Change and W. P. Carey School of Business, Arizona State University, Tempe, Arizona, United States of America, <sup>4</sup>Department of Geography and Earth Sciences, University of North Carolina at Charlotte, Charlotte, North Carolina, United States of America publié par Juan A. Añel, Universidade de Vigo, Espagne - 18 mai 2010 - <http://www.plosone.org/article/fetchObjectAttachment.action;jsessionid=50AF59601C55327D7EE4CD6EA8DF1E8C.ambra01?uri=info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0013541&representation=PDF> – cite par Hubert Guillaud, rédacteur en chef d'Internet Actu, responsable de la veille de la Fédération Internet Nouvelle Génération (FING) dans *Comprendre les lois de la ville*, Internet ACTU, 6 janvier 2011 – <http://www.internetactu.net/2011/01/06/comprendre-les-lois-de-la-ville/>
- <sup>43</sup> O. G. Selfridge. "Pandemonium: A paradigm for learning." In D. V. Blake and A. M. Uttley, editors, *Proceedings of the Symposium on Mechanisation of Thought Processes*, pages 511-529, London, 1959
- <sup>44</sup> Steven Johnson, *Emergence, the connected lives of ants, brain, cities and software – Penguin Books, 2001 – pp 54-55*
- <sup>45</sup> Steven Johnson, *Emergence, the connected lives of ants, brain, cities and software – Penguin Books, 2001 – pp 56*
- <sup>46</sup> John von Neumann, Arthur W. Burks, *Theory of Self-Reproducing Automata*, University of Illinois Press (1966)
- <sup>47</sup> Martin Gardner, *Mathematical Games. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game « life »*, Scientific American n° 223 (Octobre 1970), p. 120-123.
- <sup>48</sup> Wolfram, Stephen, *A New Kind of Science*. Wolfram Media, Inc., May 14, 2002. ISBN 1-57955-008-8
- <sup>49</sup> Keller, E. F.; Segel, L. A.. "Initiation of slime mold aggregation viewed as an instability". J. Theor. Biol. 26: 399. - <http://dx.doi.org/10.1016%2F0022-5193%2870%2990092-5>
- <sup>50</sup> Boids: Reynolds, C. W. (1987) *Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model*, in *Computer Graphics*, 21(4) (SIGGRAPH '87 Conference Proceedings) pages 25-34. Source: [www.red3d.com/cwr/boids/](http://www.red3d.com/cwr/boids/)
- <sup>51</sup> Science Daily. 01/04/2008. "Planes, Trains and Ant Hills: Computer scientists simulate activity of ants to reduce airline delays." [http://www.sciencedaily.com/videos/2008/0406-planes\\_trains\\_and\\_ant\\_hills.htm](http://www.sciencedaily.com/videos/2008/0406-planes_trains_and_ant_hills.htm)
- <sup>52</sup> David B. Fogel, *Foundations of evolutionary computation*, 2006, Natural Selection, Inc., 3333 N. Torrey Pines Ct., Suite 200, La Jolla, CA, USA 92037 – [http://l.academicdirect.org/Horticulture/GAs/Refs/\\_other\\_Fogel/Fogel\\_2006\\_Foundations\\_EC\\_SPIE.pdf](http://l.academicdirect.org/Horticulture/GAs/Refs/_other_Fogel/Fogel_2006_Foundations_EC_SPIE.pdf)
- <sup>53</sup> Barricelli, Nils Aall (1954). "Esempi numerici di processi di evoluzione". *Methodos*: 45–68
- <sup>54</sup> Numerical testing of evolution theories - NA Barricelli - *Acta Biotheoretica*, 1962 - Springer

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

---

<sup>55</sup> Barricelli, Nils Aall (1957). "Symbiogenetic evolution processes realized by artificial methods". *Methodos*: 143–182.

<sup>56</sup> Barricelli, "Numerical Testing of Evolution Theories: Part I," 70., extrait de DARWIN AMONG THE MACHINES; OR, THE ORIGINS OF [ARTIFICIAL] LIFE, A Presentation By George Dyson, 2005 - <http://informatics.indiana.edu/larry/al4ai/extras/DysonG.DarwinMachines.pdf>

<sup>57</sup> Fraser, A. S., "Simulation of genetic systems by automatic digital computers. I. Introduction," *Aust. J. Biol. Sci.*, vol. 10, pp. 484–491, 1957

<sup>58</sup> David B. Fogel, *Foundations of evolutionary computation*, 2006, Natural Selection, Inc., 3333 N. Torrey Pines Ct., Suite 200, La Jolla, CA, USA 92037 – p6

<sup>59</sup> Rechenberg, Ingo (1973). *Evolutionsstrategie*. Stuttgart: Holzmann-Froboog. ISBN 3772803733.

Schwefel, Hans-Paul (1974). *Numerische Optimierung von Computer-Modellen* (PhD thesis).

Schwefel, Hans-Paul (1977). *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie : mit einer vergleichenden Einführung in die Hill-Climbing- und Zufallsstrategie*. Basel; Stuttgart: Birkhäuser. ISBN 3764308761.

Schwefel, Hans-Paul (1981). *Numerical optimization of computer models* (Translation of 1977 *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie*). Chichester ; New York: Wiley. ISBN 0471099880.

<sup>60</sup> KOLAREVIC, Branko. *Architecture in the digital age: design and manufacturing*. London: Taylor & Francis, 2005.

<sup>61</sup> STEINØ, Nicolai; VEIRUM, Niels. "Parametric Urban Design". CONGRESS AESOP, 5., 2005, Vienna, Anais... Vienna : [s.n.], 2005., cite dans SILVA, R.C.; AMORIM, L.M.E. *Parametric urbanism: emergence, limits and perspectives of a new trend in urban design based on parametric design systems*. Trans. Anja Pratschke. In *V!RUS*. N. 3. São Carlos: Nomads.usp, 2010. Available at: <http://www.nomads.usp.br/virus/virus03/submitted/layout.php?item=2&lang=en>

<sup>62</sup> GERBER, David. *Towards a parametric urbanism*. Interactive Cities. Paris: Anomos e Hyx Edições, 2006

<sup>63</sup> STEINØ, Nicolai; VEIRUM, Niels. "Parametric Urban Design". CONGRESS AESOP, 5., 2005, Vienna, Anais... Vienna : [s.n.], 2005., cite dans SILVA, R.C.; AMORIM, L.M.E. – "Parametric urbanism: emergence, limits and perspectives of a new trend in urban design based on parametric design systems". Trans. Anja Pratschke. In *V!RUS*. N. 3. São Carlos: Nomads.usp, 2010. Available at: <http://www.nomads.usp.br/virus/virus03/submitted/layout.php?item=2&lang=en>

<sup>64</sup> SILVA, R.C.; AMORIM, L.M.E. *Parametric urbanism: emergence, limits and perspectives of a new trend in urban design based on parametric design systems*. Trans. Anja Pratschke. In *V!RUS*. N. 3. São Carlos: Nomads.usp, 2010. Available at: <http://www.nomads.usp.br/virus/virus03/submitted/layout.php?item=2&lang=en>

<sup>65</sup> Parametricism as Style - Parametricist Manifesto - Patrik Schumacher, London 2008 – Présenté et débattu au Dark Side Club1 , 11th Architecture Biennale, Venice 2008 - <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm>

<sup>66</sup> Parametricism - A New Global Style for Architecture and Urban Design - Patrik Schumacher, London 2008 – p19 - Published in: *AD Architectural Design - Digital Cities*, Vol 79, No 4, July/August 2009, guest editor: Neil Leach, general editor: Helen Castle - <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20-%20A%20New%20Global%20Style%20for%20Architecture%20and%20Urban%20Design.html>

<sup>67</sup> HILLIER, Bill; HANSON, Julienne. *The social logic of space*. London: Cambridge University Press, 1984

<sup>68</sup> HOLANDA, Frederico et al. *Arquitetura e urbanidade*. São Paulo: ProEditores Associados, 2003, extrait de SILVA, R.C.; AMORIM, L.M.E. *Parametric urbanism: emergence, limits and perspectives of a new trend in urban design based on parametric design systems*. (Op. Cit.)

<sup>69</sup> John Frazer, *An Evolutionary Architecture*, Architectural Association Publications, Themes VII, copyright John Frazer and the Architectural Association 1995 - <http://www.aaschool.ac.uk/publications/ea/intro.html>

<sup>70</sup> Michael Batty, *Cities and Complexity*, MIT Press, Cambridge, 2005

<sup>71</sup> Michael Batty, *Generating Cities from the Bottom-Up: Using Complexity Theory for Effective Design – Clusters Editions*, 2008 - <http://www.casa.ucl.ac.uk/ASU/LectureB.pdf>

<sup>72</sup> Christopher G Langton (1998). *Artificial life: an overview*. MIT Press.

<sup>73</sup> Pour une comparaison de Swarm, NetLogo, Repast et OBEUS, lire "MODELLING AND SIMULATION OF COMPLEX SYSTEMS WITH GEOSPATIAL AGENTS, Pedro Ribeiro de Andrade, INPE, 2008 - [http://www.dpi.inpe.br/gilberto/teses/pedro\\_thesis\\_proposal.pdf](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/teses/pedro_thesis_proposal.pdf)

<sup>74</sup> Prusinkiewicz, Przemyslaw; James Hanan (1989). *Lindenmayer Systems, Fractals, and Plants* (Lecture Notes in Biomathematics). Springer-Verlag.

<sup>75</sup> Przemyslaw Prusinkiewicz, *Modelling plant growth and development*, publié dans *Current Opinions in Plant Biology* 2004, Special issue: Growth and Development, Elsevier, 2004

---

# VILLES EMERGENTES, VILLES MUTANTES

---

<sup>76</sup> Michael Hensel, Computing Self-Organisation: Environnementally Sensitive Growth Modelling – Architectural Design Vol 76 No 2, Mars-Avril 2008

<sup>77</sup> Dennis Dollens, Digital-Botanic Architecture et Digital-Botanic Architecture II, <http://www.tumbletruss.com/>

<sup>78</sup> Luc Schuiten, Habitarbre, Archiborescence et Vegetal City (2009), Mardaga - <http://citevegetale.net/>

<sup>79</sup> Chlorofilia, Herman Diaz Alonso (Xefirotarch) et Peter Frankfurt (Imaginary Forces), History Channel, City of the Future Competition - Los Angeles Museum of Contemporary Art - <http://www.imaginaryforces.com/archive/alphabetical/chlorofilia/>

<sup>80</sup> Neil Leach, Swarm Urbanism, Architectural Design Vol 79, No 4, Juillet-Août 2009, pp56-63

<sup>81</sup> Parametricism - A New Global Style for Architecture and Urban Design, Patrik Schumacher, London 2008 - Published in: AD Architectural Design - Digital Cities, Vol 79, No 4, July/August 2009 - <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20-%20A%20New%20Global%20Style%20for%20Architecture%20and%20Urban%20Design.html>

<sup>82</sup> Frei Otto, Occupying and Connecting – Thoughts on Territories and Spheres of Influence with Particular Reference to Human Settlement, Edition Axel Menges, Stuttgart/London 2009, p.45

<sup>83</sup> Ming Tang, University of Cincinnati, Jonathon Anderson, University of North Carolina Greensboro - Information Urbanism, Parametric urbanism in junction with GIS data processing & fabrication – ARCC conference 2011, avril 2011 - <http://ming3d.com/upload/paper/ARCC2011-37.pdf>

<sup>84</sup> Ming Tang, Jonathon Anderson, Op. Cit.

<sup>85</sup> INTRAVEIN – PARAMETRIC URBANISM - Brian Dale, Gerard Joson, Ioannis Orfanos, Pavlos Xanthopoulos, MArch Thesis Project, Architectural Association School of Architecture, Design Research Lab - [http://www.ntua.gr/archtech/forum/papers2008/ie07\\_book\\_chapter\\_intravein\\_parametric\\_urbanism%20.pdf](http://www.ntua.gr/archtech/forum/papers2008/ie07_book_chapter_intravein_parametric_urbanism%20.pdf)

<sup>86</sup> The Limits of Urban Simulation, an interview with Manuel DeLanda réalisée par Neil Leach - AD Architectural Design - Digital Cities, Vol 79, No 4, July/August 2009, pp50-5, guest editor: Neil Leach, general editor: Helen Castle

<sup>87</sup> Han Feng & Yu Zhang - COMPUTATIONAL URBANISM - A PARAMETRIC RELATIONAL URBAN MODEL FOR URBAN PLOT RATIO ALLOCATION - The 4th International Conference of the International Forum on Urbanism (IFoU) 2009 Amsterdam/Delft - The New Urban Question – Urbanism beyond Neo-Liberalism

<sup>88</sup> Olivier Scheffer, L'architecture bionique: quand l'architecture s'inspire de la nature – éditions Symbiopolis, février 2011 – [www.symbiopolis.org](http://www.symbiopolis.org)

<sup>89</sup> Martin Hanczyc, Institute of Physics and Chemistry, University of Southern Denmark, STRUCTURE AND THE SYNTHESIS OF LIFE, in PROTOCELL ARCHTECTURE – AD March / April 2011

<sup>90</sup> T Toyota, N Maru, MM Hanczyc, T Ikegami, T Sugawara, Self-propelled Oil Droplets Consuming Fuel Surfactant, Journal of the American Chemical Society 131, 2009, pp 5012-13

<sup>91</sup> R Armstrong, Living Buildings: Plectic Systems Architecture, Technoetic Arts Journal, op cit, pp 74-94

<sup>92</sup> Smart materials and technologies for the architecture and design professions: elements and control systems, Michelle Addington and Daniel Schodek, Architectural Press, 2005

<sup>93</sup> Utility Fog: The Stuff that Dreams Are Made Of - J. Storrs Hall, Research Fellow of the Institute for Molecular Manufacturing - <http://www.kurzweilai.net/utility-fog-the-stuff-that-dreams-are-made-of>

<sup>94</sup> A NEW KIND OF BUILDING - Professor Kas OOSTERHUIS – Op. Cit.

<sup>95</sup> A NEW KIND OF BUILDING - Professor Kas OOSTERHUIS – Op. Cit.

<sup>96</sup> A NEW KIND OF BUILDING - Professor Kas OOSTERHUIS - Technical University of Delft, Faculty of Architecture, Delft, The Netherlands - 6 septembre 2004 - <http://www.oosterhuis.nl/quickstart/index.php?id=540>

<sup>97</sup> N. Negroponte, Soft Architecture Machines, MIT Press, 1975, preface

<sup>98</sup> John Frazer, An Evolutionary Architecture, Op. Cit.

<sup>99</sup> Les 5 modalités de l'urbanisme participatif, Yves Chalas, Professeur à l'Institut d'Urbanisme de Grenoble, février 2009 - <http://www.calameo.com/books/0001986014268208491c6>

<sup>100</sup> Who is in Control? Virtual Design Processes - Abhishek Bij - [http://www.coa.gov.in/mag/Archi\\_March10-lowres/18-25-Archi\\_Mar10.pdf](http://www.coa.gov.in/mag/Archi_March10-lowres/18-25-Archi_Mar10.pdf)