

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de **DOCTORAT EN SCIENCES**

En : Architecture

Spécialité : Ville, patrimoine et urbanisme

Par : M. BEKHELIFI Ahmed El Amine

Sujet :

Application des « théories de complexité » dans l'analyse de la morphogénèse urbaine

Cas d'étude : les tissus urbains traditionnels en Algérie

Soutenue publiquement, le 16 / 04 / 24, devant le jury composé de :

M. BOUMECHRA Nadir	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. DJEDID Abdelkader	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
M. BENHAMOUCHE Mustapha	Professeur	Univ. Blida	Co- Directeur de thèse
M. HAMMA Walid	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
M. AOUISSI Hani Amir	M.R.A.	C.R.E. Annaba	Examineur
M. BOURDIM Sidi Mohamed	Professeur	Cent. Univ. Maghnia	Examineur
M. GHOMARI Fouad	Professeur	Univ. Tlemcen	Invité
M. RAHAL Farid	Professeur	U.S.T.O.	Invité

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de **DOCTORAT EN SCIENCES**

En : Architecture

Spécialité : Ville, patrimoine et urbanisme

Par : M. BEKHELIFI Ahmed El Amine

Sujet :

Application des « théories de complexité » dans l'analyse de la morphogénèse urbaine

Cas d'étude : les tissus urbains traditionnels en Algérie

Soutenue publiquement, le 16 / 04 / 24, devant le jury composé de :

M. BOUMECHRA Nadir	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. DJEDID Abdelkader	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
M. BENHAMOUCHE Mustapha	Professeur	Univ. Blida	Co- Directeur de thèse
M. HAMMA Walid	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
M. AOUISSI Hani Amir	M.R.A.	C.R.E. Annaba	Examineur
M. BOURDIM Sidi Mohamed	Professeur	Cent. Univ. Maghnia	Examineur
M. GHOMARI Fouad	Professeur	Univ. Tlemcen	Invité
M. RAHAL Farid	Professeur	U.S.T.O.	Invité

. Résumé

La ville n'est pas un objet figé ni un simple assemblage de formes, mais le produit d'une morphogenèse urbaine, entendue comme un processus dynamique, continu et adaptatif de formation et de transformation. Cette morphogenèse résulte de l'articulation entre facteurs sociaux, économiques, politiques et juridiques, qui interagissent dans le temps et produisent des organisations spatiales en constante évolution. Considérée sous cet angle, la ville apparaît comme un système complexe, où les formes visibles traduisent des processus invisibles d'organisation et d'adaptation. Or, les approches classiques de la morphologie urbaine, essentiellement descriptives et forgées dans des contextes occidentaux, peinent à saisir cette dimension dynamique.

Dans ce cadre, les théories de la complexité offrent un cadre conceptuel et méthodologique pertinent pour analyser la morphogenèse urbaine. Elles considèrent la ville comme un système où les formes émergent des interactions multiples. La géométrie fractale permet d'interpréter l'irrégularité apparente des tissus urbains en la reliant à des invariances d'échelle ; tandis que la théorie des réseaux modélise les rues comme des graphes, mettant en évidence hiérarchies, et centralité ; et enfin la simulation par automates cellulaires offre un outil opérationnel pour reproduire et explorer la dynamique temporelle de la morphogenèse à partir de règles locales simples. L'articulation de ces approches permet de relier les formes visibles aux processus qui les produisent, en mettant en évidence l'organisation sous-jacente et l'évolution des formes urbaines.

Les villes islamiques traditionnelles constituent un exemple révélateur de l'approche morphogénétique. Loin de correspondre à une image de désordre, elles se structurent selon des règles précises issues du droit islamique, de la vie communautaire et des exigences fonctionnelles. L'irrégularité apparente des tissus urbains ne traduit pas une absence de planification, mais révèle au contraire une organisation fonctionnelle et adaptative, où chaque ajustement local contribue à la cohérence d'ensemble. Cette morphogenèse incrémentale, guidée par des normes sociales, juridiques et culturelles, engendre des structures globales cohérentes.

La recherche combine analyse fractale, théorie des réseaux et simulation par automates cellulaires appliquées à quatre villes algériennes, notamment la Casbah d'Alger, la médina de Tlemcen, le ksar de Ghardaïa et le ksar d'Ouargla, afin d'examiner leurs morphogenèses. Les résultats montrent que leurs réseaux viaires suivent une distribution en loi de puissance, confirmant une organisation hiérarchisée et l'existence d'invariances d'échelle caractéristiques des systèmes complexes, où l'irrégularité visible révèle une logique profonde. L'objectif de la thèse est de montrer que les théories de la complexité, à travers leurs outils analytiques et de simulation, permettent d'offrir une autre lecture de la morphogenèse urbaine et de renouveler la compréhension des villes islamiques traditionnelles, tout en ouvrant des perspectives pour leur valorisation patrimoniale.

Mots clés : morphogenèse urbaine, théories de la complexité, ville islamique, fractales, rue, théorie des réseaux, automates cellulaires.

. Abstract

The city is not a fixed object nor a mere assemblage of forms, but the product of an urban morphogenesis understood as a dynamic, continuous, and adaptive process of formation and transformation. This morphogenesis results from the interplay of social, economic, political, and legal factors that interact over time to produce spatial organizations in constant evolution. Seen from this perspective, the city appears as a complex system, where visible forms reflect invisible processes of organization and adaptation. However, classical approaches to urban morphology, essentially descriptive and shaped within Western contexts, struggle to capture this dynamic dimension.

Within this framework, complexity theories provide a relevant conceptual and methodological basis for analyzing urban morphogenesis. They regard the city as a system in which forms emerge from multiple interactions. Fractal geometry makes it possible to interpret the apparent irregularity of urban fabrics by linking it to scale invariance; network theory models streets as graphs, highlighting hierarchy and centrality; and finally, cellular automata simulation offers an operational tool to reproduce and explore the temporal dynamics of morphogenesis based on simple local rules. The articulation of these approaches helps connect visible forms to the processes that generate them, shedding light on the underlying organization and the evolution of urban forms.

Traditional Islamic cities provide a revealing example of the morphogenetic approach. Far from representing disorder, they are structured according to precise rules derived from Islamic law, community life, and functional requirements. The apparent irregularity of urban fabrics does not indicate an absence of planning, but instead reveals a functional and adaptive organization in which each local adjustment contributes to overall coherence. This incremental morphogenesis, guided by social, legal, and cultural norms, generates globally coherent structures.

The research combines fractal analysis, network theory, and cellular automata simulation applied to four Algerian cities, namely the Casbah of Algiers, the medina of Tlemcen, the ksar of Ghardaïa, and the ksar of Ouargla, in order to examine their morphogenesis. The results show that their street networks follow a power-law distribution, confirming a hierarchical organization and the existence of scale invariance characteristic of complex systems, where visible irregularity reveals an underlying logic. The objective of the dissertation is to demonstrate that complexity theories, through their analytical and simulation tools, provide an alternative reading of urban morphogenesis and renew the understanding of traditional Islamic cities, while opening new perspectives for their heritage valorization.

Keywords : urban morphogenesis, complexity theories, Islamic city, fractals, street, network theory, cellular automata.

ملخص

المدينة ليست كياناً ثابتاً أو مجرد تجميع للأشكال، بل هي نتاج تشكّل حضري، يُفهم كعملية ديناميكية ومستمرة وتكيفية للتكوين والتحول. ينتج هذا التشكّل عن الترابط بين العوامل الاجتماعية والاقتصادية والسياسية والقانونية، التي تتفاعل عبر الزمن وتنتج تنظيمات مكانية في تطور مستمر. من هذا المنظور، تظهر المدينة كنظام معقد، حيث تعكس الأشكال المرئية عمليات غير مرئية من التنظيم والتكيف. غير أن المقاربات الكلاسيكية للمورفولوجيا الحضرية، التي هي في جوهرها وصفية وتشكلت في سياقات غربية، تجد صعوبة في استيعاب هذا البعد الديناميكي.

في هذا الإطار، تقدم نظريات التعقيد إطاراً مفاهيمياً ومنهجياً ملائماً لتحليل التشكّل الحضري. فهي تعتبر المدينة نظاماً تنبثق فيه الأشكال من تفاعلات متعددة. تسمح الهندسة الكسرية بتفسير عدم الانتظام الظاهري للأنسجة الحضرية من خلال ربطه بثوابت المقياس؛ بينما تقوم نظرية الشبكات بنمذجة الشوارع على شكل رسوم بيانية، مما يبرز التراتيبات والمراكز؛ وأخيراً، توفر المحاكاة بواسطة الأوتوماتا الخلوية أداة عملية لإعادة إنتاج واستكشاف الديناميكية الزمنية للتشكّل الحضري بناءً على قواعد محلية بسيطة. إن الربط بين هذه المقاربات يسمح بربط الأشكال المرئية بالعمليات التي تنتجها، من خلال إبراز التنظيم الكامن وتطور الأشكال الحضرية.

تُعد المدن الإسلامية التقليدية مثلاً كاشفاً للمقاربة التشكلية. فبعيداً عن صورتها كرمز للفوضى، تتشكل هذه المدن وفقاً لقواعد دقيقة مستمدة من الشريعة الإسلامية والحياة المجتمعية والمتطلبات الوظيفية. إن عدم الانتظام الظاهري للأنسجة الحضرية لا يعكس غياب التخطيط، بل يكشف على العكس عن تنظيم وظيفي وتكيفي، حيث يساهم كل تعديل محلي في تحقيق التماسك الكلي. هذا التشكّل الحضري التراكمي، الموجه بمعايير اجتماعية وقانونية وثقافية، يُؤد هياكل كلية متماسكة.

يجمع هذا البحث بين التحليل الكسري ونظرية الشبكات والمحاكاة بواسطة الأوتوماتا الخلوية، مطبقاً على أربع مدن جزائرية، وهي قصبة الجزائر، ومدينة تلمسان القديمة، وقصر غرداية، وقصر ورقلة، بهدف دراسة تشكّلها الحضري. تظهر النتائج أن شبكات طرقها تتبع توزيعاً بقانون القوة، مما يؤكد وجود تنظيم هرمي وثوابت مقياس مميزة للأنظمة المعقدة، حيث يكشف عدم الانتظام المرئي عن منطق عميق. يهدف هذا البحث إلى إثبات أن نظريات التعقيد، من خلال أدواتها التحليلية والمحاكاة، تتيح قراءة مختلفة للتشكّل الحضري وتجديد فهم المدن الإسلامية التقليدية، مع فتح آفاق جديدة لتنميتها كتراث.

الكلمات المفتاحية: تشكّل حضري، نظريات التعقيد، المدينة الإسلامية، الهندسة الكسرية، شارع، نظرية الشبكات، أوتوماتا خلوية

. Remerciements

Lorsque j'ai entamé ce travail de thèse, je me suis senti face à une vaste cité inconnue. Ses ruelles étroites et sinueuses me semblaient former un labyrinthe où chaque pas soulevait plus de questions qu'il n'apportait de réponses. Je n'avais pour guide qu'une curiosité et quelques outils fragiles, encore hésitants. Mais dans ce chemin parfois épineux, j'ai eu la chance de croiser des regards bienveillants, des voix patientes et des mains tendues. Sans ces rencontres, cette traversée n'aurait pas été possible.

Mon premier grand merci va à mon directeur de thèse, le Professeur Abdelkader DJEDID. Déjà présent à mes côtés durant mon magistère, vous avez accompagné mon parcours depuis ses débuts, en me guidant avec patience et bienveillance. Votre soutien constant, vos conseils avisés et votre rigueur scientifique ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail. Je vous suis profondément reconnaissant d'avoir cru en moi, de m'avoir orienté dans les moments de doute et d'avoir toujours su trouver les mots justes pour me remettre sur le bon chemin.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à mon co-directeur, le Professeur Mustapha BENHAMOUCHE. Dès mon magistère, vos travaux avant-gardistes sur la ville islamique, la complexité et le fiqh al-Omran ont marqué mon cheminement intellectuel. Grâce à vous, j'ai pu accéder à une littérature spécialisée, découvrir de nouvelles références et enrichir mes perspectives de recherche. Certes, nos échanges ont parfois révélé des divergences, notamment sur l'usage de l'approche quantitative. Mais au-delà de ces différences, je demeure et resterai l'un de vos disciples les plus fidèles, admiratif de votre vision et de la profondeur de vos contributions.

Je tiens à adresser mes remerciements respectueux aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail. Ma profonde gratitude va au Professeur Nadir BOUMECHRA, qui me fait l'honneur de présider ce jury, ainsi qu'au Professeur Walid HAMMA, au Docteur Hani Amir AOUISSI et au Professeur Sidi Mohamed BOURDIM, qui ont bien voulu examiner cette thèse avec toute la rigueur scientifique qu'exige un tel exercice. J'adresse également mes sincères remerciements au Professeur Fouad GHOMARI et au Professeur Farid RAHAL, pour leur présence ce au sein de ce jury en qualité d'invités. Leur disponibilité, leur expertise et leurs remarques critiques donnent à cette thèse toute sa valeur scientifique. Leur regard croisé, issu d'horizons institutionnels et disciplinaires complémentaires, constitue pour moi une occasion précieuse d'enrichir ma réflexion et de mieux mesurer la portée de mes recherches. Je leur suis profondément reconnaissant du temps consacré à la lecture de ce manuscrit et de l'honneur qu'ils me font en participant à ce jury.

Je souhaite aussi exprimer mes remerciements les plus sincères au Docteur Jérémy CENCI, mon directeur de stage à Mons en Belgique. Merci pour votre disponibilité, vos conseils précieux et votre regard attentif qui m'ont guidé et enrichi tout au long de cette expérience. Je n'oublie pas non plus tous les enseignants et chercheurs de la Faculté d'architecture de Mons, dont l'accueil chaleureux et les échanges fructueux ont rendu ce séjour particulièrement formateur et inoubliable. À travers eux, j'ai découvert un environnement scientifique et humain d'une grande richesse, qui a marqué mon parcours et consolidé mes convictions. Je souhaite également remercier le laboratoire *Complexys* à Mons, où j'ai eu l'occasion de vivre une expérience scientifique et humaine inoubliable. Merci aux chercheurs que j'y ai rencontrés, pour leur ouverture, leur disponibilité et leur inspiration. Côté d'une communauté internationale passionnée par la complexité fut une étape décisive

dans mon cheminement : elle m'a donné confiance dans mes intuitions et m'a offert des outils pour les approfondir.

Je tiens à adresser un grand merci à l'ensemble de ma famille. À mes parents, que Dieu les protège, pour leur soutien indéfectible, à la fois moral et financier, tout au long de ma formation. Merci pour la confiance que vous m'avez toujours témoignée et pour l'éducation fondée sur l'effort et la persévérance que vous m'avez transmise. À mon épouse Imene, je dois une reconnaissance toute particulière : c'est elle qui a porté, avec patience et courage, la charge du foyer et l'éducation du grand monsieur M'hamed Malek, pendant que je partageais mon temps entre l'enseignement et la recherche. Son soutien discret mais constant a été la force invisible qui m'a permis de mener à bien ce travail.

Je souhaite également exprimer toute ma gratitude à mon frère Docteur Okba BEKHELIFI, chercheur d'excellence en informatique. Son apport à ce travail a été majeur : par ses conseils, ses échanges scientifiques et ses contributions en matière de modélisation. Mais, par modestie, il a toujours refusé d'apparaître dans les publications issues de cette recherche. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance profonde et de mon admiration pour sa rigueur et sa générosité. Un remerciement particulier va à monsieur Imad Eddine ALLIOUCHE, géomaticien d'excellence. Son aide dans la préparation des données a été plus que précieuse : grâce à sa rigueur et à son savoir-faire, de nombreuses étapes de cette recherche ont pu aboutir avec clarté et fiabilité. Sa contribution, discrète mais essentielle, restera pour moi un des piliers techniques de ce travail.

J'adresse aussi ma reconnaissance à plusieurs professeurs et chercheurs internationaux qui ont enrichi ce travail par leurs conseils et leur soutien. Je remercie chaleureusement le Professeur Bin JIANG de l'Université de Gävle, en Suède, pour ses échanges stimulants et ses conseils éclairés sur la théorie des réseaux. Ma gratitude va également au Professeur Jamel AKBAR de Fatih Sultan Mehmet University d'Istanbul, pour ses échanges précieux et pour m'avoir accordé l'autorisation d'utiliser ses travaux protégés par droits d'auteur, ainsi qu'au Professeur Hicham MORDTADA de la King Abdul Aziz University de Jeddah, pour l'octroi de droits similaires. Je tiens aussi à remercier les grands professeurs et références scientifiques Peter LARKHAM et Attilio PETRUCCIOLI, qui ont accepté de reviewer mon article et m'ont donné la chance de publier dans une revue prestigieuse telle que *Urban Morphology*. Leur regard critique et bienveillant m'a permis de renforcer mes arguments et d'améliorer la qualité de mon travail.

Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel du CRASC d'Oran. Ce centre de recherche, véritable seconde maison pour moi, a été un lieu d'inspiration, d'échanges et de soutien. J'y ai trouvé non seulement un espace scientifique confortable, mais aussi une atmosphère fraternelle qui m'a accompagné tout au long de ce parcours. À toutes celles et tous ceux qui y travaillent et qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à m'encourager et à faciliter mon cheminement, je souhaite exprimer ici ma profonde reconnaissance. Mes remerciements vont aussi à mes collègues et amis, pour les moments partagés, les débats passionnés comme les instants plus légers. La recherche est souvent une marche solitaire, mais vos présences ont apporté chaleur et complicité. Ces échanges m'ont aidé à garder le cap dans les périodes de doute et à célébrer les petites victoires du quotidien.

Enfin, je voudrais adresser un remerciement particulier à toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont soutenu tout au long de ce parcours. Ils sont trop nombreux pour être tous cités ici, mais chacun, par un geste, une parole, un conseil ou un simple

encouragement, a contribué à alléger les moments difficiles et à rendre cette aventure plus humaine. Ce manuscrit est autant le fruit de leurs présences discrètes que de mes propres efforts.

A mes grands parents

. Tables des matières

Résumé.....	III
Abstract.....	IV
ملخص	V
Remerciements.....	VI
Dédicace.....	VIII
Liste des figures.....	XVII
Liste des tableaux.....	XXV
Liste des abréviations.....	XXVI
Avant-propos.....	XXVII

. Chapitre 1 : Introduction générale

. Introduction.....	30
1. Cadre de recherche et problématique.....	32
1.1. La morphogenèse urbaine, de la forme aux processus.....	32
1.2. Les théories de la complexité, changement du paradigme scientifique.....	33
1.3. La ville islamique traditionnelle, mythes et réalités.....	36
1.4. Problématique et question de la recherche.....	38
2. Hypothèse de la recherche.....	39
3. Méthodologie de la recherche.....	40
3.1. Étapes méthodologiques.....	41
3.2. Cas d'étude.....	43
4. Contributions attendues de la recherche.....	43
5. Structure de la thèse.....	44
6. Limites et perspectives de la recherche.....	46

. Chapitre 2 : La morphogenèse, émergence de la forme par le processus

. Introduction.....	53
1. Définition de la morphogenèse.....	53
1.1. Lexique et étymologie.....	54
1.2. Définition selon la discipline scientifique.....	54

1.2.1. Sciences biologiques.....	55
1.2.2. Sciences de la terre.....	55
1.2.3. Mathématiques.....	56
1.2.4. Sciences sociales.....	57
2. Forme générée par processus, notions et lois.....	58
2.1. Lois génératrices de formes.....	59
2.2. Apports de la complexité à la morphogenèse.....	60
3. Historique et travaux précurseurs.....	61
3.1. D’Arcy Thompson, « <i>On Growth and Form</i> ».....	61
3.2. Alan Turing, « <i>The chemical basis of morphogenesis</i> ».....	63
3.3. René Thom, « <i>Modèles mathématiques de la morphogénèse</i> ».....	65
3.4. Christopher Alexander, « <i>Notes on the Synthesis of Form</i> ».....	66
4. Morphogénèse urbaine.....	68
4.1. Approches classiques descriptives.....	68
4.2. Approches dynamiques.....	70
4.3. La morphogenèse urbaine à travers les théories de la complexité.....	74
5. Morphogénèse et architecture.....	76
. Conclusion.....	82

Chapitre 3 : Théories de la complexité et science des systèmes complexes, fondements et applications à la ville

. Introduction.....	88
1. Complexité, théories de complexité, et science des systèmes complexes.....	88
1.1. Définition linguistique et étymologique.....	89
1.2. Définitions scientifiques et paradigme de la complexité.....	90
1.3. Des systèmes aux systèmes complexes.....	96
2. Notions fondamentales de la complexité.....	99
2.1. Émergence.....	99

2.2. Auto organisation.....	102
3. Aperçu historique, quatre générations de la complexité.....	104
3.1. Première génération, années 1940-1950.....	104
3.2. Deuxième génération, années 1950-1980.....	105
3.3. Troisième génération, années 1980-2000.....	105
3.4. Quatrième génération, depuis les années 2000.....	106
4. Théories de complexité appliquées à l'urbain.....	109
5. Morphogenèse urbaine et théories de la complexité : modèles et méthodes.....	113
. Conclusion.....	122

Chapitre 4 : Ville islamique traditionnelle, mythes et réalités

. Introduction.....	128
1. La ville islamique traditionnelle : terminologie et caractéristiques.....	128
1.1. L'unité résidentielle.....	130
1.2. La mosquée et les différents équipements.....	133
1.3. Structures commerciales et de production économique.....	134
1.4. Organisation spatiale et structurelle.....	136
2. Origine et évolution historique, vers une typologie.....	139
2.1. Villes fondées par les musulmans.....	139
2.1.1. Médine, archétype de l'urbanisation islamique.....	140
2.1.2. <i>Al Amsar</i>	141
2.2.3. La ville-fort « <i>Ribat</i> ».....	143
2.2.4. La ville princière/capitale.....	143
2.2. Villes héritées.....	145
3. Paradigmes traitant la ville islamique traditionnelle.....	146
3.1. Récits de voyageurs.....	147
3.2. L'orientalisme.....	148

3.3. Marxisme.....	150
3.4. Fonctionnalité, organisation spatiale et structurelle.....	152
3.5. Planification, rapport autorité / habitants.....	154
3.6. Régionalisme critique, culture et contexte.....	155
3.7. Processus et mécanismes juridiques.....	156
4. Processus et mécanismes producteurs de la ville islamique.....	158
4.1. Échelle macro, décisions par gouvernants.....	159
4.2. Echelle micro, décisions par habitants.....	160
4.3. Échelle méso, décision par institutions.....	164
5. La ville islamique comme système complexe.....	166
. Conclusion.....	167
Chapitre 5 : Rue et réseau viaire, éléments structurants et supports méthodologiques	
. Introduction.....	172
1. Rue et réseau viaire, éléments morphologiques fondamentaux.....	172
1.1. Morphologie urbaine, écoles et cadres d'interprétation.....	173
1.2. Approche de la morphogenèse progressive.....	175
2. Rue et réseau viaire en études urbaines.....	176
2.1. Le réseau viaire comme image de la ville.....	176
2.2. Le réseau viaire comme lieu de vie et d'urbanité.....	180
2.3. Le réseau viaire comme support de la circulation.....	180
2.4. Refus et rejet moderniste.....	181
2.5. Réhabilitation et critiques postmodernes.....	183
3. Lecture typologique du réseau viaire.....	184
3.1. Réseau Orthogonal.....	184
3.2. Réseau concentrique.....	185
3.3. Réseaux Radial.....	186

3.4. Réseau en arbre.....	187
3.5. Réseau organique, ordre et désordre.....	189
4. Rue et réseau viaire dans la ville islamique.....	191
4.1. Hiérarchie et type.....	192
4.2. Règles et statut juridique.....	194
4.3. L’empiètement sur la rue, problématique centrale.....	198
5. Vers une lecture systémique du réseau viaire selon la théorie des réseaux.....	200
. Conclusion.....	202
Chapitre 6 : Fractales et morphogenèse urbaine, modèle de la complexité	
. Introduction.....	206
1. Fondements des fractales, histoire et cadre conceptuel.....	207
1. 1. Historique et terminologie.....	207
1.2. Fractales, cadre conceptuel et paradigme de la complexité.....	210
2. Caractéristiques des fractales.....	213
2.1. Irrégularité géométrique.....	214
2.2. Itération et processus génératif.....	214
2.3. Autosimilarité.....	217
2.4. L’invariance d’échelle.....	217
2.5. Dimension fractale.....	218
2.6. Autres caractéristiques.....	218
3. Application des fractales en études urbaines.....	219
3.1. Les fractales, modèle et langage de la complexité urbaine.....	219
3.2. Fractales et morphogenèse urbaine.....	221
3.3. Exemples de différentes applications.....	223
3.3.1 La géométrie fractale dans la morphologie urbaine.....	224
3.3.2. Les fractales dans les réseaux viaires.....	226

4. Application des fractales en architecture.....	228
4.1. Les fractales comme outil d'analyse critique.....	231
4.2. Les fractales comme outil de conception.....	233
4.2.1. L'approche d'autosimilarité.....	233
4.2.2. L'approche du rythme fractal.....	236
5. Application des fractales dans l'architecture et l'urbanisme islamiques.....	236
. Conclusion.....	241
 Chapitre 7 : Modélisation de la morphogenèse urbaine par la théorie des réseaux, méthode de la complexité	
. Introduction.....	248
1. La ville, du système urbain spatial au système complexe.....	248
1.1. Organisation, structure et interaction dans un système spatial.....	249
1.2. La ville comme système spatial complexe.....	251
1.3. Organisations dans les systèmes urbains complexes.....	253
2. Modélisation de la morphogenèse urbaine.....	254
2.1. Échelles d'observation dans la modélisation des systèmes urbains complexes...	259
2.2. Dimension spatiale dans la modélisation de la morphogénèse urbaine.....	260
3. Modélisation de la morphogenèse urbaine par la théorie des réseaux.....	261
3.1. Origine, évolution, et application de la théorie des réseaux.....	262
3.2. Types de réseaux.....	264
3.2.1. Réseaux dynamiques.....	267
3.2.2. Réseaux complexes.....	269
3.2.3. Réseaux spatiaux.....	271
4. Réseaux spatiaux : approches de représentation et mesures d'analyse.....	271
4.1. Représentation des réseaux spatiaux.....	272
4.1.1. Graphe primal « <i>primal graph</i> ».....	272
4.1.2. Graphe dual « <i>Dual Graph</i> » et ses variantes.....	272

4.1.3. Graphe de Delaunay.....	272
4.2. Mesures et indicateurs d'analyse.....	273
4.3. Indicateurs globaux.....	274
4.4. Indicateurs locaux.....	276
4.5. Indicateurs de centralité.....	277
4.6. Distribution spatiale et statistique des indicateurs.....	279
5. Génération et mesure des réseaux spatiaux : méthodes et outils.....	283
. Conclusion.....	287

Chapitre 8 : Invariance d'échelle du réseau viaire traditionnel, propriété morphogénétique de la complexité

. Introduction.....	294
1. Théories de la complexité et fractalité des structures urbaines.....	295
2. Processus de formation et modèle fractal.....	296
3. Invariance d'échelle du réseau viaire, cas des villes traditionnelles algériennes.....	301
3.1. Cas d'études, localisation et présentation.....	304
3.2. Casbah d'Alger.....	305
3.3. Médina de Tlemcen.....	307
3.4. Ksar de Ghardaïa.....	309
3.5. Ksar de Ouargla.....	311
4. Méthode et données.....	313
5. Discussion et interprétation des résultats.....	318
. Conclusion.....	322

Chapitre 9 : Simulation morphogénétique par automates cellulaires, modèle expérimental de la complexité

. Introduction.....	328
1. Définition générale des automates cellulaires.....	329
1.1. Repères conceptuels et descriptifs.....	329

1.2. Origines et évolution historique.....	330
1.3. Automates cellulaires et complexité.....	332
2. Principes fondamentaux.....	333
3. Transfert et applications des automates cellulaires en études urbaines.....	335
3.1. Modélisation et simulation des dynamiques urbaines.....	337
3.2. Hybridation avec d'autres modèles.....	338
3.3. Application en ville islamique traditionnelle ?	341
4. Simulation morphogénétique de la casbah d'Alger à l'échelle macro.....	342
4.1 Aire d'étude et données.....	344
4.2. Variables affectant la morphogenèse urbaine.....	345
4.2.1. Site et conditions naturelles, élévation et pentes.....	345
4.2.2. Réseau viaire.....	347
4.3. Méthodologie appliquée.....	347
5. Discussion et interprétation des résultats.....	349
. Conclusion.....	353
Chapitre 10 : Conclusion générale.....	359
Bibliographie générale.....	364

. Liste des figures

Figure 2.1	Morphogenèse animale et végétale, processus de différenciation cellulaire....	55
Figure 2.2	Schéma explicatif du processus de morphogenèse terrestre.....	56
Figure 2.3	Modèle de morphogenèse sociale selon Archer.....	57
Figure 2.4	Forme globale de la ville selon les lois morphologiques.....	60
Figure 2.5	Schémas de croissance morphogénétique dans la nature : (A) développement embryonnaire par subdivision symétrique ; (B) Cristallisation arborescente ; (C) croissance différenciée des feuilles.....	62
Figure 2.6	Formation des taches et de rayures selon le modèle de Turing.....	63
Figure 2.7	Motifs naturels pouvant être décrits avec le modèle de Turing.....	63
Figure 2.8	Formation des motifs par le modèle réaction-diffusion : (A) Motifs générés issus d'un système réaction-diffusion simulé numériquement ; (B) Représentation graphique de la densité du morphogène.....	64
Figure 2.9	Morphogenèse d'un arbre selon le modèle « <i>L-system</i> ».....	64
Figure 2.10	Représentation d'une transition de forme.....	65
Figure 2.11	Structures de problèmes et sous-systèmes en interaction : (A) Le graphe de connexions entre les éléments d'un système complexe ; (B) La topologie des contraintes et interdépendances ; (C) La décomposition du graphe initial en sous-groupes fortement connectés.....	66
Figure 2.12	La structure conceptuelle du schéma de conception d'Alexander.....	67
Figure 2.13	Schéma de la monogenèse urbaine sur la base d'un pattern.....	71
Figure 2.14	Modèle conceptuel de la morphogenèse urbaine schématisant l'interaction entre nature, croissance, et dynamique de la forme urbaine.....	72
Figure 2.15	Structure urbaine et réseau viaire : (A) Plan d'un fragment d'une ville ; (B) Présentation en réseau de voies.....	73
Figure 2.16	Etapes de morphogenèse urbaine à travers le réseau viaire.....	73
Figure 2.17	La morphogenèse urbaine comme processus global de stratification spatio-temporelle.....	74
Figure 2.18	Structures et projets architecturales inspirées d'une goutte d'eau.....	77
Figure 2.19.	Génération de formes architecturales a base de simulation analogiques aux formes naturelles.....	78

Figure 2.20	Planches d'anatomie réalisées par Léonard de Vinci.....	79
Figure 2.21	La biologie animale influençant le système constructif : (A) Squelette d'un dinosaure ; (B) Différentes configurations de poutres reprenant logique structurelle du dinosaure.....	80
Figure 2.22	Ailes de mouche reprises comme structures en membranes.....	80
Figure 2.23	Différentes structures légères conçues par Frei Otto reprenant l'approche biomimétiste.....	80
Figure 2.24	Vue sur la Sagrada Família.....	81
Figure 2.25	Détails architecturaux reprenant les figures naturelles dans l'œuvre de Victor. Horta.....	81
Figure 3.1	Schéma conceptuel d'une théorie.....	90
Figure 3.2	Les systèmes complexes, englobent : (A) Systèmes naturels et artificiels ; (B) Les caractéristiques et principes clés.....	98
Figure 3.3	Schéma abstrait de l'émergence dans les systèmes complexes.....	100
Figure 3.4	Les flocons de neige illustrant l'émergence par la formation de motifs fractals et symétriques.....	100
Figure 3.5	Application du concept d'émergence en architecture.....	101
Figure 3.6	Simulation illustrant émergence de la forme urbaine par itérations.....	101
Figure 3.7	Manifestation de l'auto organisation dans différents systèmes naturels et biologiques.....	103
Figure 3.8	Médina de Ghadamès comme exemple de l'auto organisation dans la ville islamique traditionnelle.....	103
Figure 3.9	Evolution historique des théories de la complexité en quatre générations.....	107
Figure 3.10	Abstraction de l'application des théories de complexité en études urbaines selon Stephan.....	107
Figure 3.11	Carte schématique illustrant l'évolution historique des théories de la complexité.....	108
Figure 3.12	Hierarchie de la structure urbaine dans les villes traditionnelles et modernes.....	110
Figure 3.13	Schéma illustrant typologie de la complexité.....	113
Figure 3.14	Illustration schématique de l'évolution historique des méthodologies de modélisation.....	117

Figure 3.15	Carte visuelle et organisationnelle de la science des systèmes complexes, décomposée en sept domaines thématiques.....	121
Figure 3.16	Carte visuelle synthétique des méthodes en science des systèmes complexes, décomposée en six domaines thématiques.....	122
Figure 4.1	Différentes couches structurelles dans la ville islamique au Maghreb.....	130
Figure 4.2	Hiérarchie et discrétion dans l'accès à l'habitation.....	131
Figure 4.3	Forme et organisation spatiale de l'habitation traditionnelle : (A) plan d'une maison à Fès ; Schéma d'extension hypothétique de la maison.....	132
Figure 4.4	Centralité de la mosquée dans la ville islamique : (A) Mosquée du prophète à Médine ; (B) Schéma de cette centralité au niveau des quartiers.....	133
Figure 4.5	Structures commerciales en médina : (A) Plan du souk de Barham Pacha à Alep ; (B) coupe de khan Ed Diwan à Alep.....	135
Figure 4.6	Typologie de marché et articulation avec la ville dans la médina de Fès.....	135
Figure 4.7	Transformation du réseau viaire quadrillé gréco-romain en souk islamique selon Sauvaget.....	136
Figure 4.8	Schéma résumant caractéristiques et organisation d'un fragment de médina.....	138
Figure 4.9	Plan hypothétique de Médine à l'époque de prophète.....	141
Figure 4.10	Modèle schématique de Basra et de ses khittats.....	143
Figure 4.11	Modèle schématique en plan et en coupe de Bagdad à l'époque de sa fondation selon Lassner.....	144
Figure 4.12	Transformation de la structure urbaine d'Alep selon Sauvaget : (A) époque byzantine ; (B) sous le règne islamique.....	146
Figure 4.13	Modèle schématique de la ville islamique selon l'approche orientaliste : (A) d'après Marçais ; (B) d'après Sauvaget.....	149
Figure 4.14	Khittat de Koufa à l'aube de sa fondation.....	151
Figure 4.15	Fondation de la ville de Koufa : (A) Khittat ; (B) Sahn composé de la mosquée centrale et du palais du gouverneur.....	155
Figure 4.16	Modèle schématique de la formation urbaine de la ville islamique.....	159
Figure 4.17	Schéma hypothétique expliquant la préemption comme mécanisme à l'échelle micro.....	163

Figure 4.18	Schéma hypothétique expliquant densification selon le principe de revivification.....	163
Figure 4.19	Schéma hypothétique expliquant divisions selon droit de succession.....	164
Figure 5.1	Restitution du plan de la ville de Haradum.....	177
Figure 5.2	Vue sur Rome à l'époque du pape Sixte Quint.....	178
Figure 5.3	Etude des Places et des rues médiévales.....	179
Figure 5.4	Maquette du plan voisin pour Paris.....	182
Figure 5.5	Plan du Timgad romain.....	185
Figure 5.6	Plan de Paris en 1911.....	186
Figure 5.7	Plan de Palmanova en 1600.....	187
Figure 5.8	Différentes configurations de l'aménagement en réseau arborassent dans la banlieue américaine.....	188
Figure 5.9	Typologie du réseau viaire.....	190
Figure 5.10	Réseau viaire de Médine au moyen âge.....	193
Figure 5.11	Hierarchie viaire de la médina de Tunis.....	194
Figure 5.12	Mesure des rues suivant règles juridiques et fonctionnalité.....	195
Figure 5.13	Schémas d'empiètement de rues dans les villes islamiques.....	198
Figure 5.14	Empiètement de rues et dynamique du réseau viaire.....	199
Figure 5.15	Fragment urbain et son graphe spatial.....	201
Figure 6.1	Schématisation du calcul de la cote britannique par l'approche fractale selon Mandelbrot.....	208
Figure 6.2	Figures fractales originaires : (A) Ensemble de Cantor ; (B) Folcon de Koch.....	209
Figure 6.3	Fractales dans les arts africains : (A) tapisserie ; (B) Poterie.....	210
Figure 6.4	Fractales irrégulières vulgarisées par Mandelbrot : (A) Ensemble de Julia ; (B) Fractale de Mandelbrot.....	214
Figure 6.5	Itération et génération de la courbe de Koch.....	215
Figure 6.6	Itération et génération de l'ensemble de Cantor.....	216
Figure 6.7	Itération et génération du tapis de Sierpinski.....	216

Figure 6.8	Morphogenèse du tissu urbain traditionnel suivant la logique fractale : (A) Itération du réseau viaire ; (B) Fragment du Caire historique.....	221
Figure 6.9	Genèse des formes urbaines africaines selon les itérations fractales : (A) Forme rectangulaire ; (B) Forme circulaire.....	223
Figure 6.10	Morphogenèse et calcul de la dimension fractale d'Istanbul par le comptage de boîtes.....	224
Figure 6.11	Distribution invariante d'échelle en loi de puissance du réseau viaire à Séoul.....	225
Figure 6.12	Réseau ferroviaire suivant une organisation fractale.....	226
Figure 6.13	Dimension fractale géométrique et dimension fractale structurelle de la métropole d'Atlanta.....	227
Figure 6.14	Itérations et génération d'une architecture fractale en plan et en façade.....	230
Figure 6.15	Vues en coupe et en axonométrie de la « <i>House 11a</i> ».....	231
Figure 6.16	Mesure de la dimension fractale des maisons modernes célèbres : (A) Robbie house ; (B) La villa Savoye.....	232
Figure 6.17	Autosimilarité dans les temples hindous illustrée en plan et en façade.....	234
Figure 6.18	Autosimilarité dans les églises gothiques illustrée en coupe.....	234
Figure 6.19	Autosimilarité de la façade de l'église « <i>Santa Croce</i> » de Florence.....	234
Figure 6.20	Conception fractales de Bruce Goff : (A) Plan de la maison Price ; (B) Plan de la maison Gutman.....	235
Figure 6.21	Victoria and Albert Museum, exemple de conception fractale : (A) Vue sur la volumétrie ; (B) motifs fractals en façades.....	235
Figure 6.22	Rythme fractal dans la façade des logements pour les étudiants en médecine à l'université Catholique de Louvain ; conception de Lucien Kroll en 1970.....	236
Figure 6.23	Fractalité de la ville islamique traditionnelle : (A) Division fractale à l'échelle de l'ilot ; (B) bifurcation et genèse à l'échelle de la maison.....	237
Figure 6.24	Droit islamique « <i>Mawarith</i> » et division fractale : (A) : à l'échelle de l'ilot ; (B) à l'échelle du quartier.....	238
Figure 6.25	Autosimilarité et genèse fractale de la madarsa d'Al Sultan Hassan.....	239
Figure 6.26	Méthode de comptage de boîte et calcul de la dimension fractale du jardin « <i>Chahár-Bágh</i> ».....	240
Figure 7.1	Abstraction schématique des étapes d'une modélisation selon Le Moigne....	256

Figure 7.2	Schéma de la triangulation systémique selon Le Moigne.....	258
Figure 7.3	Echelles d'observation des systèmes urbain.....	260
Figure 7.4	Abstraction topologique des ponts de Königsberg.....	264
Figure 7.5	Représentation schématique des types de réseaux.....	266
Figure 7.6	Evolution diachronique d'un réseau dynamique.....	267
Figure 7.7	Réseau dynamique : (A) réseau de galeries produit par 200 fourmis sur 3 jours ; (B) La représentation sous forme de graphe de deux exemples de réseaux de galeries.....	268
Figure 7.8	Dynamique du réseau viaire de Paris et de tissu vasculaire.....	268
Figure 7.9	Transition d'un réseau régulier à un réseau aléatoire via un réseau petit monde.....	270
Figure 7.10	Distributions statistiques des indicateurs de connectivité.....	270
Figure 7.11	Hierarchie du réseau viaire d'Avignon, et son graphe de connectivité.....	270
Figure 7.12	Représentation schématique des différents types des réseaux : (A) graphe primal ; (B), (C) et (D) graphe dual ; (E) graphe de Delaunay.....	273
Figure 7.13.	Distribution spatiale des indicateurs de centralité.....	280
Figure 7.14	Distribution du degré de nœuds dans un réseau aléatoire et dans un réseau invariant d'échelle.....	282
Figure 7.15	Distribution des indicateurs de centralité, représentés en histogrammes.....	282
Figure 7.16	Représentation schématique du fonctionnement des SIG.....	284
Figure 7.17	Représentation schématique des données en raster et en vecteurs.....	286
Figure 7.18.	Processus de génération du graphe primal du Ksar de Ouargla : (A) image satellitaire ; (B) vectorisation du réseau viaire par SIG ; (C) génération du graphe primal...	286
Figure 8.1	Différentes couches structurelles dans la ville islamique : (A) L'environnement bâti, composé de maisons individuelles similaires avec des cours intérieures ; (B) et (C) Le réseau viaire aux niveaux urbain et individuel ; (D) Rue en cul-de-sac au niveau du quartier.....	287
Figure 8.2	Modèle conceptuel expliquant la formation de la ville islamique traditionnelle.....	298
Figure 8.3	Fondation et genèse de la ville islamique traditionnelle : (A) Koufa telle que proposé par Al Janabi ; (B) Damas, avec son plan islamique irrégulier superposé au plan orthogonal romain sous-jacent.....	299

Figure 8.4	Schéma conceptuel d'itération des rues, inspiré de l'analyse de Ben Hamouche (2009) appliquant le modèle fractal de Cantor à un fragment de la casbah d'Alger.....	300
Figure 8.5	Genèse fractale et ramification du réseau viaire : (A) Itération du modèle mathématique théorique ; (B) Fragment du réseau viaire du Caire historique comme exemple correspondant.....	300
Figure 8.6	Ressemblance du schéma de l'urbanisation de Nouakchott et du tapis de Sierpinski.....	301
Figure 8.7	Fractalité des structures urbaines : (A) Modèle d'une ville fractale idéale, équivalente à une fractale géométrique. (B) Exemple d'une ville fractale théorique.....	302
Figure 8.8	Distribution statique des différents réseaux viaires observés : (A) et (B) en Europe ; (C) En Amérique ; (D) En Chine.....	303
Figure 8.9	Localisation géographique des cas d'étude sélectionnés.....	304
Figure 8.10	Carte de la structure urbaine de la casbah d'Alger en 1831 par le Capitaine Morin.....	306
Figure 8.11	Réseau viaire historique de la casbah d'Alger.....	306
Figure 8.12	Structure urbaine de la médina de à l'aube de l'invasion coloniale française.....	308
Figure 8.13	Plan de Tlemcen vers 1889 par le Commandant Allard.....	308
Figure 8.14	Structure urbaine du Ksar de Ghardaïa au début des années 1920.....	310
Figure 8.15	Morphogenèse hypothétique du Ksar de Ghardaïa en anneaux radioconcentriques selon Benkari.....	310
Figure 8.16	Structure urbaine du Ksar de Ouargla.....	312
Figure 8.17	Morphogenèse hypothétique du Ksar de Ouargla en selon l'OGEBBC.....	312
Figure 8.18	Schéma conceptuel reliant la morphogenèse, la complexité et la nature fractale d'un réseau viaire.....	314
Figure 8.19	Etapes de la méthode appliquée dans l'analyse.....	314
Figure 8.20	Réseaux spatiaux des villes traditionnelles analysées : (A) Alger ; (B) Tlemcen ; (C) Ghardaïa ; et (D) Ouargla.....	315
Figure 8.21	Histogrammes de la centralité d'intermédierité des villes traditionnelles : (A) Alger ; (B) Tlemcen ; (C) Ghardaïa ; et (D) Ouargla.....	321
Figures 8.22	Histogramme de la centralité de proximité des villes traditionnelles : (A) Alger ; (B) Tlemcen ; (C) Ghardaïa ; et (D) Ouargla.....	321

Figure 9.1	Le jeu de vie de Conway sur quatre étapes.....	331
Figure 9.2	Exemples de classes de patterns générés par l'évolution d'automates cellulaires.....	332
Figure 9.3	Voisinage en automates : (A) Cellules de Von Neumann ; (B) et (C) cellules de Moore.....	335
Figure 9.4	Illustration graphique des modèles en AC utilisant une grille de 25 cellules.....	336
Figure 9.5	Étapes de la croissance d'une ville cellulaire.....	340
Figure 9.6	Représentation des automates cellulaires et des graphes associés.....	341
Figure 9.7	Evolution de la casbah d'Alger lors des périodes pré-ottomane, ottomane et lors de l'arrivée des andalous, superposée sur un fond de carte issu d'Open Street Map.....	344
Figure 9.8	Carte d'élévation issue d'une image SRTM, montrant les évolutions de la casbah d'Alger lors des périodes pré-ottomane, ottomane et après l'arrivée des andalous....	346
Figure 9.9	Carte des pentes calculées à partir des données satellitaires SRTM, montrant les évolutions de la casbah d'Alger lors des périodes pré-ottomane, ottomane et après l'arrivée des andalous.....	346
Figure 9.10	Phases d'extension du réseau viaire de la casbah d'Alger.....	347
Figure 9.11	Organigramme de la méthodologie développée.....	348
Figure 9.12	Courbe d'apprentissage du réseau de neurones artificiels.....	350
Figure 9.13	Carte de la fonction de certitude de la simulation : (A) basé sur le réseau de neurones artificiels ; (B) basée sur la régression logistique.....	351
Figure 9.14.	Evolution de la ville historique d'Alger en l'an 1708 réalisée à partir du modèle d'automate cellulaire calibré et basé sur un algorithme de régression logistique.....	352
Figure 9.15.	Localisation des casernes militaires dans la casbah d'Alger.....	352

. Liste des tableaux

Tableau 3.1	Diagnostic des problèmes : approche analytique et systémique.....	93
Tableau 3.2	Résolution des problèmes : approche analytique et systémique.....	94
Tableau 3.3.	Quatre conceptualisations de la théorie de la complexité et implications pour la recherche à méthodes mixtes.....	95
Tableau 7.1	Synthèse des types de réseaux et de leurs dimensions d'analyse.....	265
Tableau 8.1	Indicateurs globaux des réseaux spatiaux analysés.....	319
Tableau 8.2	Résultats de l'analyse du test de loi de puissance des réseaux spatiaux.....	320
Tableau 9.1	Comparaison des modèles hybrides en LULC : méthodes, performances et limites.....	343
Tableau 9.2	Evolution de la population de la ville historique d'Alger selon les périodes..	345
Tableau 9.3	Coefficients de corrélation de Pearson entre les variables en entrée.....	349

. Liste des abréviations

AC : Automates cellulaires.

ANN : Réseaux de neurones artificiels

A.P.C. : Assemblée populaire communal.

B.N.F. : Bibliothèque nationale de France.

O.G.E.B.C. : Office National de Gestion et d'Exploitation des Biens Culturels Protégés.

O.S.M. : Open Street Map.

C.A.S.A. : Centre for Advanced Spatial Analysis.

CB : Centralité d'intermédiarité « *Betweenness centrality* ».

CC : Centralité de proximité « *Closness centrality* ».

CD : Centralité de degré « *Centrality degree* ».

CI : Centralité d'information « *Information centrality* ».

CIAM : Congrès international de l'architecture moderne.

CS : Centralité de rectitude « *Straightness centrality* ».

LR : Régression logistique.

LULC : Modèles de changement d'occupation du sol « *Land Use Land Cover* »

S.I.G. : Système d'information géographique.

UNESCO : Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (de anglais : *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*).

U.C.L. : University college of London.

ICCROM : Centre international d'études pour la conservation et la restauration des biens culturels.

Avant-propos

Ville islamique ? Morphogenèse ? complexité ? Fractales ?

Ces quatre notions, aujourd'hui au cœur de cette thèse, n'ont pas toujours fait sens ensemble dans mon parcours. Au début de mes études en post graduation, la morphogenèse m'était étrangère, la complexité paraissait abstraite, et la ville islamique semblait trop souvent enfermée dans des représentations figées ou stéréotypées. Avant même mon inscription au magistère, les fractales n'étaient pour moi qu'une curiosité, souvent associée aux discours des jeunes diplômés en architecture. Elles servaient alors d'argumentaire pour justifier les formes étranges et les bizarreries du courant déconstructiviste. J'y voyais davantage un effet de mode esthétique qu'un véritable outil scientifique. Rien, à cette époque, ne laissait présager que ces formes géométriques allaient devenir, pour moi, une clé de lecture décisive pour comprendre la ville et notamment l'islamique.

C'est au cours de ma première année de magistère, en 2012, que mon regard a basculé. J'ai eu la chance de croiser le chemin de Monsieur Jean-Michel PERIGNON, enseignant passionné et grand spécialiste en patrimoine. Ses échanges, d'une richesse rare, ont éveillé en moi une réflexion nouvelle : il m'a montré que les fractales ne sont pas seulement des figures abstraites ou des justifications architecturales, mais qu'elles peuvent aussi révéler la complexité sous-jacente des formes urbaines, notamment dans les contextes non occidentaux. Ses travaux de cartographie de villages africains dans les années 1970 avaient déjà mis en évidence des régularités invisibles derrière ce qui semblait irrégulier ou chaotique. Il m'a ouvert les yeux sur l'importance de la complexité comme cadre d'analyse et sur la pertinence d'appliquer cette grille de lecture aux médinas. Parallèlement, j'ai toujours eu une attirance pour les méthodes quantitatives, que je considère comme des appuis solides aux questionnements qualitatifs. Les échanges avec les collègues du laboratoire LET de Lyon, invités à Tlemcen en 2013, ont renforcé cette inclination. Encouragé par ces discussions, j'ai entrepris, dès mon mémoire de magistère, une première tentative d'analyse fractale appliquée aux dynamiques urbaines de l'agglomération oranaise. Bien qu'exploratoire, cet essai constituait une étape fondatrice : il m'a permis de mesurer le potentiel, mais aussi les limites, de l'approche fractale, et d'entrevoir la richesse des perspectives offertes par l'alliance entre complexité et études urbaines.

La rencontre ultérieure avec le professeur Mustapha BENHAMOUCHE a été une occasion décisive pour élargir encore mes horizons. Grâce à lui, j'ai pu accéder à une littérature anglophone spécialisée, découvrir des références que je ne connaissais pas, et approfondir ma réflexion sur l'articulation entre complexité, ville islamique et « Fiqh al-Omran ». Ses travaux m'ont semblé véritablement avant-gardistes, car ils proposaient une lecture de la morphogenèse urbaine islamique qui dépassait les clichés classiques et ouvrait un champ de recherche inédit. Un moment marquant de mon parcours fut également mon stage à Mons, en Belgique, où j'ai intégré le laboratoire *Complexys*. Cette occasion m'a permis de côtoyer des chercheurs de renommée internationale et d'échanger sur la complexité dans divers domaines scientifiques. Ces rencontres ont nourri ma réflexion et renforcé ma conviction que les outils issus de la science de la complexité offrent une voie pertinente pour penser la ville, notamment dans les contextes historiques et patrimoniaux.

Ce travail de thèse, tel qu'il est présenté aujourd'hui, s'inscrit dans ce cheminement intellectuel et personnel. Il demeure un essai modeste, mais animé par l'ambition sincère de comprendre et de repenser la ville islamique traditionnelle. Formé dans le champ du

patrimoine, j'ai toujours été sensible à la nécessité de préserver et de sauvegarder nos médinas et ksour. Mais préserver ne se réduit pas à figer des formes : il s'agit aussi de saisir les logiques profondes qui les ont façonnées, afin de les valoriser et de les inscrire dans les transformations contemporaines. C'est donc avec humilité, mais aussi avec une conviction nourrie par ces années de formation, de lectures et de rencontres, que je livre au lecteur ce travail. J'espère qu'il contribuera, même modestement, à dépasser les représentations stéréotypées, à révéler la cohérence interne de la ville islamique, et à mettre en lumière sa morphogenèse complexe et adaptative.

Chapitre 1 : Introduction générale

« La vraie science, qui commence par l'expérience et s'achève par la démonstration mathématique, est synonyme de certitude »
Jean le Rond d'Alembert

« Seule une spéculation hardie peut nous faire avancer et non l'accumulation des faits »
Albert Einstein

. Introduction

La ville est le lieu d'association et d'interaction des êtres humains en vue de satisfaire leurs besoins individuels et collectifs. Elle se caractérise par l'imbrication de relations entre de nombreux acteurs, abstraits ou matériels, qui génèrent des dynamiques spatio-temporelles différentes. Les résultats de cette organisation humaine se traduisent par la transformation du territoire trouvant dans la ville son expression pleinement réalisée (Mumford, 1961). Dans cette perspective, l'étude de la ville ne consiste pas seulement à observer ses formes visibles, mais aussi à comprendre les processus qui les produisent. Chaque ville témoigne d'une histoire, d'une organisation et d'une évolution particulière, façonnée par les interactions humaines et par le temps. Ainsi, la ville doit être envisagée comme un système en dynamique continue. Face à cette réalité multiple, la ville a fait l'objet de nombreuses études dans divers domaines, mobilisant une variété d'approches et soulevant une infinité de questions. Elle est définie de manière plurielle selon les paradigmes¹ et les époques.

Fondamentalement, Weber (1995) la conçoit comme une communauté d'habitants réunis par des liens économiques, sociaux et politiques spécifiques. Pour George et Verger (2004, p. 516), la ville est un groupement de population caractérisé par une vie sociale intense et diversifiée, résultant de la concentration des fonctions économiques, administratives et culturelles. Elle est également décrite comme un lieu d'échanges, de production et de consommation, se définissant par la diversité et l'intensité des interactions sociales et économiques (Pumain, 2006a). Selon Lévy et Lussault (2013), la ville constitue un espace de concentration et d'interactions sociales, structuré par la mobilité, les échanges et les centralités. Dans une perspective différente, la ville est envisagée comme un acte de volonté, un artefact construit à partir de programmes directeurs et de plans visant à assurer son unité formelle (Kostof, 1991). Sur un autre plan, elle est interprétée comme un produit social et historique, où elle reflète à la fois l'accumulation du capital, les rapports de pouvoir et les conflits sociaux, pouvant aller jusqu'à incarner une confrontation politique (Lefebvre, 1970). Plus largement, Mumford (1961) la décrit comme le théâtre de l'action sociale, soulignant sa dimension dynamique et symbolique, la considérant comme un espace social produit, résultat d'un processus collectif de fabrication. Enfin chez Ibn Khaldoun (1978) la ville est le produit d'une civilisation organisée, née de la solidarité sociale et du regroupement humain, et elle sert de centre économique, politique et culturel. Elle croît avec la force sociale et décline lorsque cette cohésion s'affaiblit.

Cependant, Secchi (2011, p.15) confirme qu'étudier la ville n'est pas essentiellement un ensemble d'œuvres, de projets, de théories ou de normes unifiées par un sujet, par un langage et par une organisation discursive ; il n'est pas non plus un secteur d'enseignement. Il est à entendre plutôt comme la trace laissée, celle qui vise la modification continue et consciente de l'état du territoire et de la ville. Dans le prolongement de ce raisonnement, Douady (2014, p.147-148) définit la ville comme un système composé de multiples structures, d'activités, d'espaces et de réseaux en perpétuelle évolution. Au vu de sa complexité, elle devient un objet d'étude difficile à saisir dans sa globalité. Par contre, s'intéresser à une de ses

composantes a été à l'origine de nombreuses études scientifiques de tous horizons et de tous domaines. Au-delà des dimensions sociales, politiques et économiques, la ville se présente également comme un objet d'analyse à travers sa forme, support matériel et symbolique de ces dynamiques. La forme de la ville présente une dimension centrale et un intérêt majeur, comme le souligne West (2017, p.196) : « *Comprendre la forme de la ville et ses mécanismes de formation est un objet principal des études urbaines, c'est un sujet très ancien qui remonte au moins à Aristote dont une grande variété de perspectives a été élaborée...* ». Dans le même sens, Bourdin et al. (2015, p. 6) soulignent que depuis l'antiquité la ville dispose d'une forme reconnaissable. Ainsi, cette forme dans sa matérialité et au niveau des représentations, mérite d'être exploré depuis les premières expériences urbaines jusqu'à l'époque moderne.

Conjointement, plusieurs traditions théoriques ont permis d'investir la question de la forme urbaine. Selon Conzen (1960), la forme urbaine se décompose en trois niveaux fondamentaux : le plan de ville (organisation des rues et îlots), le tissu bâti (fabrication et disposition des constructions) et l'usage du sol. Muratori (1959), considère la ville comme un organisme vivant, produit d'une évolution historique continue dont chaque stratification laisse une trace visible. Caniggia et Maffei (2001) décrivent la ville comme un système de types bâtis en constante transformation, soulignant les processus de formation. Panerai et al. (1997) mettent en évidence la dimension sociale et spatiale de la forme urbaine : la forme de la ville exprime les pratiques collectives et se comprend par l'étude de l'évolution des îlots, des rues et des quartiers. De son côté, Lynch (1969) suivant la dimension cognitive et vécue de la forme urbaine, il a défini à partir de sa lisibilité et de son imageabilité, c'est-à-dire la manière dont les habitants perçoivent et mémorisent la ville. Enfin, Rossi (2006) propose une approche architecturale et mémorielle, où la ville incarne la mémoire et l'identité collective. Ainsi, la forme urbaine peut être vue tour à tour comme structure matérielle, organisme évolutif, système de types bâtis, traduction sociale, visuelle, ou artefact mémoriel.

Dans ce contexte, la ville islamique traditionnelle constitue un cas exemplaire pour mettre à l'épreuve et enrichir ces approches théoriques, en raison de son authenticité historique et morphologique qui la distingue. Elle représente à la fois un objet d'étude et un intérêt particulier : héritage historique majeur et enjeu patrimonial contemporain, elle a fait l'objet de nombreux débats et souvent de jugements stéréotypés (Nasser, 2002). Depuis la seconde moitié du XXe siècle, la préservation des environnements urbains traditionnels constitue en effet un défi primordial et multidimensionnel, impliquant des enjeux patrimoniaux, sociaux, économiques et culturels. Diverses mesures ont ainsi été adoptées aux échelles locale et internationale, incluant l'élaboration de chartes internationales, l'adoption de législations nationales de protection, la création d'institutions spécialisées et la mise en œuvre de programmes de coopération (Merlin et Choay, 1996). Toutefois, au-delà des initiatives de mise en valeur (protection, réhabilitation, classement...) de la ville islamique traditionnelle, sa compréhension dans les dimensions de sa fondation et de son évolution, demeure une question fondamentale pour la recherche scientifique. Elle reste en effet marquée par une certaine ambiguïté, souvent soumise à des stéréotypes, en particulier dans la perception de sa forme globale ainsi que de ses composants structurels, tels que ses rues et, par extension, son réseau viaire (Raymond, 1994).

À travers la diversité des définitions et des traditions de pensée, il apparaît que la ville, dans sa généralité, et la ville islamique en particulier, représente un objet d'étude complexe. Cette complexité se manifeste surtout dans la dimension formelle, qui ne peut être comprise par de simples descriptions morphologiques. Les approches classiques, bien qu'elles aient permis d'élaborer des cadres théoriques solides et utiles, révèlent leurs limites dès qu'il s'agit

d'expliquer les processus dynamiques à l'origine de la formation et de l'évolution des formes urbaines. Elles se montrent également insuffisantes lorsqu'il s'agit d'analyser des cas non occidentaux, car ces théories ont été en grande partie élaborées à partir de contextes européens et américains. Cette lacune « *Research gap* » est encore plus évidente dans le cas de la ville islamique traditionnelle, souvent enfermée dans des représentations stéréotypées qui réduisent son authenticité. Pour dépasser ces visions figées et subjectives, il devient nécessaire de s'appuyer sur de nouveaux outils conceptuels et méthodologiques, capables de rendre compte de la complexité réelle de ces formes urbaines. C'est précisément dans cette optique que s'inscrit la présente recherche, dont les fondements scientifiques et la problématique seront exposés ci-après.

1. Cadre de recherche et problématique

La présente thèse s'inscrit dans le champ des études urbaines et patrimoniales, en plaçant la forme de la ville traditionnelle au centre de l'analyse. Cette forme ne se réduit pas à une simple structure matérielle : elle constitue également le résultat d'un processus historique de formation et de transformation, reflétant les dynamiques sociales, économiques et culturelles qui ont façonné l'espace urbain. Elle offre ainsi un prisme privilégié pour comprendre l'évolution urbaine sur le long terme. Pour orienter cette étude, il est nécessaire de définir clairement son cadre. Il s'agira d'abord de situer la réflexion dans son contexte scientifique et épistémologique, puis de présenter l'état des recherches existantes sur la ville traditionnelle islamique, en abordant ses représentations et ses enjeux. Enfin, la section exposera la problématique et la question de recherche qui guideront l'ensemble de l'étude.

1.1. La morphogenèse urbaine, de la forme aux processus

Oliveira (2016, p. 2-8) définit la forme de la ville comme l'objet central de la morphologie urbaine. Elle est constituée de trois éléments physiques fondamentaux : les bâtiments, les parcelles et les rues, qui structurent l'espace urbain. Mais cette forme n'est pas statique : elle est le résultat d'un long processus historique de transformation, façonné par les forces sociales, culturelles et économiques. Elle représente aussi la mémoire collective des sociétés, matérialisée dans leurs tissus et paysages bâtis. Ainsi, cette forme urbaine doit être comprise comme un système dynamique où coexistent en permanence des éléments stables et des changements continus. Parallèlement, la forme urbaine peut être abordée de manières différentes. Pour Lévy (2015), la forme de la ville n'est pas une simple géométrie : elle est le résultat de processus sociaux, économiques et politiques, et doit être comprise comme un dispositif de relations entre les différents registres urbains : tissu, tracé, paysage, pratiques sociales, environnement. De leur côté, Franceschelli et al. (2015) soulignent le caractère dynamique de la forme urbaine, qui se transforme continuellement sous l'effet des usages, des flux et des politiques, et qu'il convient d'interpréter comme une trace matérielle des interactions multiples. Cette observation souligne la nécessité d'adopter une approche interdisciplinaire et dynamique.

En effet, l'étude de l'apparition et de l'évolution de la forme urbaine, envisagée dans une approche processuelle et dynamique, s'inscrit pleinement dans le cadre de la

morphogenèse urbaine. Selon Gauthier (2003, p. 220), cette notion concerne les modalités d'apparition et d'évolution de la ville, considérées sous l'angle de la forme. De même, Plazanet et Berger (2008, p. 11) la définissent comme l'ensemble des processus qui créent et transforment la forme urbaine. Essentiellement, la morphogenèse trouve ses racines dans les sciences biologiques, désignant les mécanismes producteurs de formes (Lesne et Bourguine, 2006, p. 13). Comme le souligne Tort (1996, p. 3061), chaque discipline comporte ses dimensions morphologiques et, par conséquent, morphogénétiques. Par ailleurs, le concept de morphogenèse est mobilisé dans différents champs disciplinaires, notamment dans les études urbaines (Roudavski, 2009). Dans ce sens, Sharpe (1986) définissait la morphogenèse urbaine comme la création et la transformation subséquente de la forme urbaine, résultat synergique des processus morphologiques. Elle vise à donner un sens aux changements affectant le plan ou l'état d'urbanisme d'une ville, en tenant compte du rôle de l'homme comme acteur central de la transformation de l'environnement bâti. L'enjeu ne réside pas uniquement dans l'observation de la forme matérielle de la ville, mais surtout dans la compréhension des processus génératifs qui l'ont produite. Comprendre la morphogenèse urbaine, c'est ainsi s'intéresser à l'articulation entre facteurs sociaux, juridiques, économiques, techniques et spatiaux qui façonnent la ville. Cette perspective déplace la recherche d'une lecture statique et descriptive vers une approche dynamique, processuelle et explicative, où la ville est envisagée comme le produit évolutif d'interactions multiples.

L'étude de la morphogenèse urbaine met en évidence que la forme de la ville n'est pas statique. Elle résulte d'un processus évolutif et dynamique, dans lequel interviennent simultanément des facteurs sociaux, économiques, culturels et spatiaux. Ces interactions multiples sont souvent difficiles à prévoir, produisant des configurations urbaines qui ne peuvent être expliquées uniquement par les approches classiques, linéaires ou réductionnistes. Pour mieux saisir ces processus, il est nécessaire de se tourner vers des cadres théoriques, conceptuels et épistémologiques capables de prendre en compte la richesse structurelle des systèmes urbains. Dans cette perspective, la ville peut être envisagée comme un système dans lequel les structures et les formes émergent progressivement des interactions locales, des pratiques sociales et des dynamiques internes, plutôt que d'être entièrement planifiées ou prévisibles. Cette approche permet de relier les mécanismes génératifs observables dans la morphogenèse aux formes finales de la ville. Elle offre également une alternative adaptée à l'analyse de contextes historiques et culturels spécifiques, comme celui des villes islamiques traditionnelles, où les interactions et les dynamiques spatiales rendent la compréhension de la ville particulièrement subtile.

1.2. Les théories de la complexité, changement du paradigme scientifique

La fin du 20^{ème} siècle marque un changement des idées formelles sur la ville en général. La pensée déterministe passe vers des approches plus systématiques. Le nouveau paradigme de complexité voit le jour (Batty 2013, p. 28). Les théories de complexité ajoutent une vision nouvelle au raisonnement sur la ville. Elles fournissent un cadre global pour comprendre son évolution (Portugali, 2000, p. 1-5). Selon Holland (2014, p.18) la complexité, autrefois un substantif ordinaire décrivant des objets comportant de nombreuses parties interconnectées, aujourd'hui, elle désigne un domaine scientifique contenant de nombreuses branches. En effet,

elle se résume dans le credo : « *le tout est plus grand que la somme des parties* » (Jiang, 2015). Parallèlement, Balmaceda et Fuentes (2016) définissent un système complexe comme un système composé d'entités, appelées aussi agents, en interaction dynamique entre elles et avec leur environnement au moyen de règles simples. Ce type de système présente différentes propriétés principalement l'émergence, un comportement collectif difficile à prédire, et qui ne résulte pas d'un contrôleur central, en d'autres termes, autoorganisé.

Avec une approche inter- et transdisciplinaire, les théories de la complexité démontrent que les villes présentent des propriétés similaires aux systèmes complexes. Ainsi, bon nombre de modèles développés pour étudier les systèmes complexes peuvent s'appliquer également aux villes, et peuvent aussi mettre en lumière différents aspects de la complexité des structures urbaines (Portugali, 2012). La forme de la ville selon les théories de complexité est définie comme un motif spatial « *pattern* » émergent des interactions des composantes du système dans un espace bien défini. Les éléments microscopiques n'ont pas et ne sont pas porteurs de la forme en eux, seule l'interaction ou la dynamique fait émerger les formes macroscopiques et éventuellement méso scopiques. Cette vision implique une grande attention aux processus de morphogénèse (Fusco, 2018, p.74-78). Ainsi, la complexité s'intéresse à la notion de prise de décision et aux mécanismes produisant les structures émergentes, elle s'associe aux nouvelles formes de géométrie fractale (Batty 2005, 5-13). Manifestement, la géométrie fractale ne se réduit pas exclusivement à une approche purement géométrique, mais à l'étude des formes et des évolutions aux rythmes, aux lois temporelles et à la morphogénèse (Dauphiné, 2011, p. 20).

Effectivement, la géométrie fractale est l'outil puissant disponible pour étudier les systèmes complexes, elle est une grammaire de la morphogénèse (Basili, 1998). Précédemment, Mandelbrot (1982, p. 1-4) a défini les fractales comme objets, dont la forme spatiale est irrégulière et dont l'irrégularité se répète à de nombreuses échelles. Selon Dauphiné (2011, p.13) les fractales se caractérisent principalement par l'autosimilarité, l'invariance d'échelle, et la dimension fractale. Premièrement, l'autosimilarité est de nature géométrique, elle désigne que l'objet est composé de parties qui sont des copies de cet objet, et signifie que le tout est semblable à ses parties, et ces parties sont encore décomposables en sous-parties identiques. Par contre, l'invariance d'échelle est de nature statistique, elle indique qu'un même caractère s'observe à toutes les échelles. Enfin, La dimension fractale est un indicateur mesurant l'irrégularité et exprimant la variation de l'information du passage d'une échelle à une autre. L'application des idées fractales aux structures urbaines ne consiste pas seulement à améliorer la description morphologique, elle peut être utile pour comprendre leur genèse (Pumain, 1998). La ville comme système complexe est un organisme évoluant et changeant selon des règles et des conditions locales qui manifestent un ordre plus global à travers de nombreuses échelles dans le temps (Allen, 2005, p.2-3). Une formation fractale de la ville rompt avec les traditions basées sur la géométrie euclidienne, la présentant comme régulière, simple et ordonnée. Approche limitée aux descriptions globales de la morphologie et aux dispositions des éléments constitutants, difficile à relier explicitement aux processus sous-jacents responsables de structurer l'espace et de générer la forme (Batty et Longley, 1994, p.10).

Au-delà des modèles comme les fractales, le changement de paradigme introduit par les théories de la complexité repose aussi sur des outils et méthodes tel que la théorie des réseaux. Balmaceda et Fuentes (2016) la présente comme un des outils formels habituels de la complexité. Par différentes représentations du réseau viaire, elle permet de traiter différents

aspects des structures urbaines (Hamaina et al. 2012). La méthode de la théorie des réseaux implique l'étude et l'analyse des graphes. Simplement, un graphe est une abstraction mathématique, une représentation formelle d'un modèle tiré de la réalité physique du réseau viaire, il s'agit de générer une représentation simplifiée du réseau de rues composé des nœuds (sommets) et des liens (arrêtes). Cette abstraction permet d'analyser différents aspects de l'organisation urbaine : hiérarchie, accessibilité, centralité et connectivité (Marshall et al. 2018). Le réseau viaire apparaît de cette manière comme une composante structurante de la morphogenèse, jouant un rôle clé dans la formation et l'évolution des villes.

Parallèlement, les automates cellulaires (AC) s'inscrivent parmi les outils issus des théories de la complexité, particulièrement adaptés à la simulation dynamique des processus complexes. Ils reposent sur l'idée que des règles locales simples, appliquées à un ensemble de cellules disposées dans une grille spatiale, peuvent générer des formes globales complexes (Mitchell 2009, p. 147). Chaque cellule évolue en fonction de son état et de celui de ses voisines, produisant au fil des itérations des structures émergentes qui ne sont pas programmées directement, mais résultent de l'auto organisation du système (Liu 2009, p.27-29). Transposés à l'étude des villes, les automates cellulaires permettent de modéliser la croissance et la transformation du tissu urbain comme un processus évolutif où l'espace, les usages et les interactions sociales interagissent de manière décentralisée. Ils offrent ainsi la possibilité de dépasser les approches statiques pour restituer la dimension temporelle de la morphogenèse, en reconstituant les dynamiques locales responsables de la production des formes urbaines observées (Batty, 2005, p.67-68). En ce sens, les automates cellulaires apparaissent comme un prolongement naturel des analyses fractales et de la théorie des réseaux, en apportant une lecture dynamique et processuelle de la complexité urbaine.

Ainsi, les théories de la complexité représentent aujourd'hui un changement majeur de paradigme dans les études urbaines. Elles offrent un cadre conceptuel et méthodologique capable de dépasser les approches classiques, souvent limitées à une analyse statique ou linéaire, et permettent de saisir les dynamiques multi-échelles des villes. Elles considèrent la ville comme un système en constante évolution, où les formes et structures émergent progressivement des interactions entre différents éléments et acteurs. Cette lecture processuelle rend possible la compréhension de la morphogenèse urbaine. Les fractales, en tant que modèle, fournissent une véritable grammaire de la morphogenèse, capable de représenter les formes urbaines, complexes et irrégulières. Elles permettent ainsi de relier les structures visibles aux processus génératifs sous-jacents, offrant une lecture formelle des dynamiques urbaines à différentes échelles. Parallèlement, la théorie des réseaux constitue un outil méthodologique pertinent pour analyser la structuration et l'organisation des villes. En représentant rues et réseaux viaires sous forme de graphes, cette méthode permet d'étudier différents aspects des composantes urbaines et de mettre en lumière les interactions qui façonnent la morphogenèse urbaine. En complément, les automates cellulaires apportent une dimension dynamique à cette lecture de la complexité urbaine, en simulant l'évolution temporelle des formes à partir de règles locales simples. Ils permettent ainsi de relier la formalisation fractale et l'analyse des réseaux à une modélisation processuelle, restituant la dimension évolutive de la morphogenèse urbaine. En somme, une approche basée sur les

théories de la complexité est particulièrement adaptée aux contextes historiques et culturels spécifiques, comme celui des villes islamiques traditionnelles, où les dynamiques sociales, économiques et spatiales produisent des formes urbaines complexes et évolutives. Elle fournit ainsi un cadre conceptuel et méthodologique capable d'expliquer non seulement la morphologie visible, mais aussi les processus génératifs.

1.3. La ville islamique traditionnelle, mythes et réalités

Le changement de direction général affectant les connaissances sur la ville en général, toucha aussi la ville islamique traditionnelle. Elle est maintenant définie et présentée comme un environnement dynamique agissant dans différentes échelles et suivant différents acteurs (Akbar, 2021). Ainsi, la ville islamique est définie comme le produit d'interactions sociales, juridiques et spatiales en constante évolution peut être décrite comme un processus dynamique fondé sur la distribution des droits et des responsabilités plutôt que sur une planification formelle imposée ou une composition de formes architecturales figées. La formation urbaine émerge d'interactions continues entre différents niveaux : à l'échelle domestique et du voisinage, les règles et les droits d'usage régulent les transformations bâties et façonnent progressivement le tissu urbain ; à l'échelle du quartier, les communautés organisées autour des mosquées et des souks instaurent des régulations collectives ; à l'échelle de la ville, l'autorité religieuse et l'État interviennent ponctuellement pour encadrer les infrastructures majeures sans contrôler tous les détails morphologiques (Hakim, 1986). Cette organisation où individus, communautés et institutions partagent la responsabilité de l'espace bâti, engendre une morphogenèse urbaine organique, auto-régulée et adaptative, marquée par la flexibilité et la capacité d'ajustement aux besoins locaux.

Selon Petruccioli (2007), les nouvelles recherches commencent à remettre en question l'orientalisme et sa vision négative sur la ville islamique. En effet, les études orientalistes sur la ville islamique traditionnelle constituaient le point du départ, et ouvraient la voie pour tout un intérêt scientifique, elles représentaient le paradigme puissant régnant sur les recherches (Neglia, 2008). Manifestement, ces études n'échappaient pas aux généralités et aux appréciations subjectives. Nombreux jugements de valeur gâchaient les résultats des recherches et influencent toujours les connaissances (Abu-Lughod, 1987). L'approche orientaliste qui régna pour longtemps, était rigidement fondée sur la comparaison entre la grille gréco-romaine orthogonale et le réseau viaire islamique irrégulier. Dans un sens dévalorisant, on se limitait à décrire la ville islamique comme ambiguë, irrationnelle et spontanée, produit d'un long moyen âge (Raymond, 2008). La ville islamique en Algérie ne faisait pas l'exception aux stéréotypes orientalistes, spécialement dans ce qui concerne sa formation, sa forme physique et son réseau viaire (Devoulx, 1870 ; Cottureau 1930 ; Marçais, 1957).

Effectivement, la réflexion sur la ville islamique a suivi des orientations diverses tout au long du XX^e siècle. À partir des années 1950, avec la fin du colonialisme, les recherches commencèrent à remettre en question l'approche orientaliste (Neglia, 2008). S'appuyant davantage sur la géographie urbaine et les sciences sociales, de nouvelles analyses et modèles d'évolution cherchèrent à repenser la ville islamique traditionnelle autrement (Guichard,

1998). Malgré cette réorientation, ces approches demeuraient essentiellement descriptives, centrées sur les aspects esthétiques, architecturales, fonctionnels, et morphologiques statiques de la structure urbaine (Akbar, 1994). De plus, elles ne se détachaient pas totalement des conclusions orientalistes, perpétuant l'image des médinas comme labyrinthes chaotiques, produits d'une évolution anarchique ou de la déformation de villes romaines héritées (Allain, 2004, p. 36-76). Cependant, Le véritable changement de paradigme en matière d'étude de la ville islamique est intervenu avec l'approche dynamique, qui la définit comme un environnement structuré par des principes clairs issus du droit islamique « *Fiqh* » et des valeurs sociales et religieuses (Al-Lahham, 2004). À travers l'étude des cas et de sources juridiques et historiques, on explique comment la mosquée, le souk, les quartiers résidentiels et les espaces publics s'organisaient autour de règles visant à protéger la vie privée, garantir l'équité entre voisins, réguler l'usage du sol et préserver l'intérêt collectif. On démontre que cet urbanisme, bien qu'organique et flexible dans sa forme, était en réalité encadré par une logique normative qui conciliait ordre social, respect des droits et adaptation aux conditions locales, offrant ainsi un modèle cohérent et fonctionnel d'aménagement urbain. (Al-Hathloul, 1981 ; Akbar, 1984 ; Hakim, 1986) remettent en cause ces stéréotypes.

Ainsi, la ville islamique n'est pas des ensembles désordonnés, sa morphogenèse peut s'expliquer par un processus organique encadré par les règles du *Fiqh*, plutôt que par une planification centralisée. La croissance urbaine était régulée par des principes juridiques et sociaux précis : largeur minimale des rues, respect de la vie privée et des droits des voisins, partage de l'eau et gestion collective de certains espaces. La mosquée centrale constituait le cœur religieux et social, autour duquel se développaient les souks et institutions, tandis que les quartiers résidentiels s'organisaient selon des solidarités familiales ou professionnelles, desservis par un réseau hiérarchisé de rues et d'impasses. Loin d'être chaotique, cette morphogenèse produisait une forme urbaine organique et fonctionnelle, conciliant liberté individuelle, cohésion communautaire et adaptation aux contraintes locales.

Une telle compréhension, qui met en évidence l'auto organisation, la régulation endogène et l'adaptabilité de la ville islamique, rejoint des notions clés de la science de la complexité telles que l'émergence, l'auto organisation et l'adaptabilité. Elle permet ainsi de considérer la ville islamique traditionnelle non plus comme un vestige du passé, mais comme un modèle pertinent de morphogenèse urbaine complexe. Les recherches récentes, nourries par ce cadre théorique, montrent que l'irrégularité apparente de ses tissus n'est pas aléatoire : elle répond à des règles génératives pouvant être décrites à l'aide de modèles fractals, de la théorie des réseaux, et des automates cellulaires. Dans ce sens, différentes recherches se questionnent sur la fiabilité des fractales et de sciences de la complexité dans la compréhension de la ville islamique (Ben Hamouche, 2009 ; 2011). Ces travaux semblent au début, au niveau hypothétique et même conceptuel, souvent formulés à la base d'analogies d'un côté entre propriétés des systèmes complexes et des fractales et d'un autre côté des propriétés et dynamiques de la ville islamique traditionnelles. Cette orientation, bien que prometteuse, demeure limitée sans validation empirique et sans formalisme mathématique. Comme le rappelle Dauphiné (2003, p.52) : « *en complexité pour éviter les analogies douteuses, voire totalement erronées et dénoncées, le recours au formalisme mathématique*

s'impose... ». De même, Sokal et Bricmont (1999) critiquent l'usage abusif de notions telles que complexité, fractales ou auto-organisation lorsqu'elles ne sont mobilisées qu'à titre métaphorique ou analogique, sans lien solide avec leur sens scientifique. Ces critiques mettent en évidence la nécessité d'un transfert rigoureux des outils et méthodes de la science de la complexité vers l'analyse des structures urbaines, condition indispensable pour dépasser le stade de la simple analogie et construire une lecture scientifique de la morphogenèse de la ville islamique.

1.4. Problématique et question de la recherche

La ville islamique traditionnelle constitue un objet d'étude particulièrement complexe, notamment dans sa dimension formelle. Son organisation spatiale, ancrée dans l'histoire et morphologiquement distinctive, résulte de processus dynamiques où les interactions sociales, les pratiques culturelles, et les règles juridiques occupent une place centrale. L'irrégularité apparente de ses formes ne traduit ni désordre ni absence de planification, mais correspond à des mécanismes génératifs précis et cohérents, qui structurent l'espace de manière subtile et fonctionnelle. Ces mécanismes, profondément ancrés dans les logiques sociales et culturelles, s'inscrivent pleinement dans la démarche de la morphogenèse urbaine, qui consiste à étudier la forme urbaine à travers les processus qui la génèrent et la transforment. En adoptant le prisme de la morphogenèse urbaine, la ville islamique peut être redéfinie comme une forme urbaine complexe et adaptative non pas comme le fruit du hasard.

Cependant, les différentes définitions et approches de la forme urbaine montrent un constat central : elles l'étudient comme un ensemble de formes matérielles, fonctionnelles ou sociales, dans une perspective descriptive et souvent limitée aux contextes occidentaux. Si ces méthodes classiques ont permis de construire des cadres conceptuels solides, elles restent insuffisantes pour saisir les processus dynamiques et génératifs à l'origine des formes urbaines, en particulier dans des contextes historiques et culturels non occidentaux. La ville islamique traditionnelle, notamment en Algérie illustrent parfaitement cette limite : souvent réduites à des représentations stéréotypées, interprétées comme désordonnées ou assimilées à des analogies simplistes, elles négligent les règles qui structurent leur organisation et leur évolution. La question de leur morphogenèse urbaine reste ouverte et insuffisamment approfondie.

De ce constat découle la nécessité d'établir un lien entre la forme observable de la ville et les processus génératifs qui l'ont produite, démarche propre à la morphogenèse urbaine. Dans cette perspective, les théories de complexité, représentent un changement de paradigme dans la conception et la compréhension des villes, en particulier de leurs formes. Donc, il est essentiel d'examiner dans quelle mesure les outils conceptuels et méthodologiques issus des théories de la complexité permettent de dépasser les limites des approches traditionnelles et de saisir la morphogenèse urbaine dans des contextes historiques et culturels spécifiques. Ces outils offrent un cadre pertinent non seulement pour analyser la morphogenèse urbaine, mais aussi pour comprendre et valoriser la ville islamique, tout en évitant de la réduire à des représentations subjectives simplifiées ou stéréotypées. C'est dans ce sens que certains outils se révèlent particulièrement pertinents : la géométrie fractale, en tant que modèle de la

complexité, rend compte de l'irrégularité et l'explique par des processus de formation itératifs et hiérarchiques ; la théorie des réseaux fournit une méthode rigoureuse pour formaliser et analyser la dynamique du réseau viaire, composante essentielle de la structure urbaine ; enfin, les automates cellulaires constituent un outil efficace pour simuler la dimension dynamique de la morphogenèse.

Ainsi, une question centrale se dégage :

Dans quelle mesure l'application des théories de la complexité permet-elle de comprendre et de modéliser la morphogenèse urbaine des villes islamiques traditionnelles, notamment en Algérie ?

Cette interrogation soulève plusieurs axes d'investigation :

- Explorer l'apport des théories de la complexité et de leurs outils méthodologiques pour comprendre et modéliser la morphogenèse des villes islamiques traditionnelles.
- Identifier et analyser simultanément les caractéristiques morphologiques et les mécanismes responsables de produire les villes islamiques traditionnelles notamment, à travers leurs composantes urbaines, et particulièrement le réseau viaire.
- Expérimenter une approche empirique de la morphogenèse urbaine à travers des cas d'étude en Algérie, fondée sur l'application des théories de la complexité, afin de dépasser les approches statiques et analogiques.

En somme, la thèse présente s'inscrit dans la nécessité de considérer la ville comme un système complexe, où les formes visibles émergent des interactions sociales, économiques, spatiales et culturelles. Elle vise à articuler un cadre conceptuel et méthodologique fondé sur une démarche structurée et un apport défini pour étudier la ville islamique traditionnelle, non seulement comme simple patrimoine culturel, mais aussi comme un système urbain complexe, évolutif et génératif. L'objectif n'est pas seulement de décrire la forme finale, mais surtout de saisir les processus de morphogenèse qui la produisent, incluant l'auto organisation, l'émergence et la régulation. Les théories de la complexité offrent ainsi un cadre adapté pour relier les structures observables aux processus génératifs qui les ont façonnées, permettant une lecture dynamique et systémique des villes. Associées à des outils tels que la géométrie fractale, qui étudie l'irrégularité et les processus de formation, et la théorie des réseaux, qui formalise la dynamique du réseau viaire, cette approche fournissent une méthode concrète pour analyser la structure urbaine dans sa complexité.

2. Hypothèse de la recherche

Les théories de la complexité offrent un cadre pertinent pour expliquer la morphogenèse des villes islamiques traditionnelles en Algérie. Cette hypothèse de nature exploratoire sera vérifiée et approfondie en mobilisant trois outils complémentaires :

- La géométrie fractale, mobilisée comme modèle, permet d'analyser et de comprendre les logiques formelles de leur morphogenèse.

- La théorie des réseaux, envisagée comme méthode de modélisation, contribue à vérifier et évaluer les caractères fractals de leurs structures.
- La simulation par automates cellulaires restitue la dimension temporelle et évolutive de la morphogenèse, en reproduisant les dynamiques locales génératrices de structures globales.

3. Méthodologie de la recherche

La méthodologie adoptée vise à tester l'hypothèse présente. Effectivement, elle s'appuie sur la caractéristique et principe d'autosimilarité, c'est-à-dire la répétition de motifs structurels à différentes échelles. Dans la ville islamique traditionnelle, cette propriété se manifeste par la répétition des motifs spatiaux, tels que l'emboîtement des ruelles dans des quartiers ou encore la hiérarchisation entre espaces publics, semi-publics et privés. Ce qui semble irrégulier au premier regard correspond en réalité à une cohérence structurelle ressemblant à celle observée dans les modèles fractals, où chaque niveau de l'organisation reproduit, avec des variations locales, la logique du tout (Ben Hamouche, 2009 ; 2011). Cette analogie confirme l'hypothèse selon laquelle la géométrie fractale constitue un modèle opératoire pour comprendre la morphogenèse urbaine : de simples règles locales, ancrées dans des contraintes sociales, culturelles et juridiques, engendrent par itérations successives des formes urbaines globales complexes, cohérentes et adaptatives. Ainsi, l'autosimilarité permet de saisir le passage des dynamiques micro-sociales aux structures macro-urbaines, offrant un cadre pertinent pour analyser la formation et l'évolution de la ville islamique traditionnelle.

Cependant, selon Fankhauser (1994, p. 42), la supposition de formation fractale basée sur l'autosimilarité du réseau viaire peut être juste théoriquement. Par contre, il est impossible de comparer directement par analogie le processus de morphogenèse urbaine à une fractale géométrique. Selon Boeing (2018a) dans le monde réel, les fractales n'existent pas parfaitement à toutes les échelles spatiales, de l'infinitésimal à l'infini, comme le font les fractales mathématiques abstraites. Les fractales présentent des caractères similaires à chaque échelle plutôt qu'une seule échelle. Concrètement, une ville est fractale si ses composants, à l'exemple du réseau viaire, ont tendance à être distribuées selon une loi de puissance, c'est-à-dire une distribution invariante d'échelle. Avec peu de grands éléments, un nombre moyen d'éléments de taille moyenne et beaucoup de petits éléments. L'invariance d'échelle est de nature statistique, elle fait référence aux caractéristiques similaires observés dans chaque échelle. C'est une propriété plus générale, elle englobe l'autosimilarité (Dauphiné 2011, p.13-14). De même, Salingaros (2005) définit une ville fractale comme une ville invariante d'échelle. Autrement dit, ses éléments morphologiques, des longueurs de rues aux empreintes de bâtiments, suivent une distribution en loi de puissance.

Par conséquent, afin de vérifier l'hypothèse de la recherche selon laquelle la géométrie fractale constitue un modèle pertinent pour comprendre la morphogenèse de la ville islamique traditionnelle, nous nous focalisons l'analyse sur l'invariance d'échelle du réseau viaire. Cette propriété fractale, caractéristique des systèmes complexes, traduit la répétition de motifs structurels à différentes échelles, permettant de relier les dynamiques locales aux formes

globales du réseau viaire urbain. Elle se manifeste par une distribution hiérarchisée des composantes du réseau : quelques artères principales, un nombre intermédiaire de voies secondaires et une multitude de ruelles locales, suivant une loi de puissance. L'étude de cette organisation fractale du tissu viaire sera combinée à la méthode de la théorie des réseaux, appliquée à la distribution des indicateurs quantitatifs, en particulier les indicateurs de centralité, afin de mettre en évidence la régularité statistique et la cohérence structurelle du réseau à différentes échelles, illustrant ainsi le principe d'invariance d'échelle. L'articulation de ces deux outils, fractales et réseaux, offre un cadre opératoire pour saisir les dynamiques de formation et d'évolution du réseau viaire.

Dans une perspective complémentaire, la simulation par les automates cellulaires apparaisse comme un prolongement naturel des approches fractales et des réseaux. Les analyses fractales permettent de mettre en évidence l'autosimilarité et l'invariance d'échelle qui caractérisent la structure urbaine, tandis que la théorie des réseaux révèle l'organisation hiérarchique et la centralité du système viaire. Toutefois, ces approches objectivent les régularités morphologiques mais ne restituent pas les mécanismes qui les produisent. C'est précisément à ce niveau que les automates cellulaires trouvent leur pertinence. En intégrant la dimension temporelle et la logique des interactions locales, ils offrent une simulation processuelle capable de reproduire l'émergence progressive des formes urbaines. La combinaison de ces trois approches permet donc une lecture intégrée de la morphogenèse : les fractales décrivent la structure globale, les réseaux éclairent l'organisation relationnelle, et les automates cellulaires restituent le processus dynamique qui les engendre. Cette approche méthodologique contribue ainsi à dépasser la simple observation des formes visibles pour accéder à la compréhension des logiques génératives sous-jacentes, ouvrant la voie à une analyse systémique et évolutive des villes islamiques traditionnelles.

3.1. Étapes méthodologiques

Pour répondre aux objectifs de la recherche, la méthodologie adoptée suit une progression en quatre étapes :

- **Approche conceptuelle**, concerne à définir la notion de la morphogenèse comme résultat de processus, puis la notion de morphogenèse urbaine, et situer la ville islamique dans le paradigme des théories de la complexité.
- **Approche contextuelle**, concerne analyse de la ville islamique, ses caractéristiques, les mécanismes responsables de sa formation, aussi, étudier la rue et le réseau viaire, base concrète de l'analyse.
- **Approche opératoire**, mobiliser les outils du modèle fractale (invariance d'échelle et lois de puissance), de la théorie des réseaux (indicateurs de centralité), et la simulation par les automates cellulaires.
- **Approche empirique**, appliquer ces outils à des cas d'étude concrets, comparer leurs structures et dégager des invariances morphologiques et organisationnelles.

Les étapes opératoire et empirique combinent :

1. L'utilisation des systèmes d'informations géographiques (S.I.G.) pour le traitement des cartes historiques des cas d'études, et la modélisation de leurs réseaux viaires en graphes.
2. Le calcul des indicateurs de centralité par le programme « *Pajek* » (Mrvar et Batagelj, 2016).
3. La vérification de la distribution en loi de puissance, ou l'analyse statistique des indicateurs via MATLAB selon la méthode de Clauset et al. (2009) et Virkar et Clauset (2014).

Ces étapes seront clôturées par une interprétation et une discussion des résultats obtenus. Cela permettra de vérifier l'invariance d'échelle du réseau viaire, c'est-à-dire d'analyser si les motifs et structures du réseau se répètent à différentes échelles, conformément au principe fractal. L'utilisation du modèle fractal permet ainsi de mettre en évidence les hiérarchies et les structures sous-jacentes du réseau urbain, tout en révélant comment les interactions dans le réseau viaire contribuent à façonner des formes urbaines cohérentes et adaptatives.

Dans le prolongement de cette analyse, la démarche méthodologique est enrichie par une dimension dynamique visant à simuler l'évolution historique des formes urbaines. Cette extension repose sur le module MOLUSCE (plugin QGIS), qui mobilise la simulation par automates cellulaires en couplage avec les données LULC (Land Use / Land Cover). Le réseau viaire y demeure une variable explicative centrale, traduisant la structuration spatiale et fonctionnelle de la ville, mais il est complété par d'autres facteurs environnementaux tels que la pente et l'altitude, afin de mieux rendre compte des contraintes physiques influençant la morphogenèse urbaine. Ce couplage entre automates cellulaires, LULC et variables explicatives multi-échelles permet ainsi de dépasser les limites d'une approche exclusivement fractale et statique. Cette extension méthodologique se décline en plusieurs opérations complémentaires :

1. Génération de couches explicatives (réseau viaire, pente, altitude).
2. Calibration du modèle sur deux dates historiques et projection sur une période ultérieure.
3. Comparaison d'algorithmes (réseaux de neurones artificiels et régression logistique) afin de sélectionner le modèle le plus performant selon des indices tels que le coefficient de Kappa ou la matrice de confusion.

En somme, dans la méthodologie appliquée, l'approche quantitative occupe une place centrale puisqu'elle permet d'objectiver les dynamiques formelles et spatiales de la ville islamique traditionnelle à travers la combinaison des outils de la complexité tels que l'invariance d'échelle et la théorie des réseaux. Comme le rappellent Groat et Wang (2013, p.

263-315), la recherche quantitative se déploie principalement sous forme d'analyses corrélationnelles et expérimentales, visant à identifier des relations statistiques entre variables spatiales et sociales ou à tester des hypothèses dans des environnements contrôlés ou simulés. L'usage des indicateurs de centralité et des distributions de réseaux viaires relève précisément de cette logique, il offre des instruments quantitatifs pertinents pour rendre compte des motifs et hiérarchies présents dans les tissus urbains. Toutefois, Groat et Wang soulignent également les limites de cette approche, notamment la réduction de la complexité des expériences vécues à des variables mesurables, et insistent sur la nécessité de combiner les méthodologies quantitatives avec des approches qualitatives et historiques. C'est dans cette perspective que la présente thèse adopte une méthodologie mixte à dominante quantitative : sur le plan opérationnel, elle repose sur des analyses quantitatives (géométrie fractale, théorie des réseaux, S.I.G., indicateurs de centralité, coefficient de Kappa) pour objectiver la morphogenèse urbaine ; en parallèle, elle s'inscrit dans un cadre conceptuel et qualitatif qui guide le choix des objets d'étude et interprète les résultats. Cette articulation permet ainsi de rendre compte de la complexité de la morphogenèse de la ville islamique traditionnelle dans ses différentes dimensions.

3.2. Cas d'étude

Pour vérifier l'hypothèse, quatre villes représentatives ont été retenues : la Casbah d'Alger, la médina de Tlemcen, le ksar de Ghardaïa et le ksar d'Ouargla. Ce choix repose sur des critères précis : fondation, genèse historique, évolution urbaine et diversité géographique algérienne, offrant un échantillon à la fois représentatif et diversifié. En effet, chacune de ces villes illustre, par sa morphologie et son organisation, les caractéristiques fréquentes des villes islamiques traditionnelles : réseaux de rues hiérarchisés, séparation claire entre espaces publics et privés, centralité religieuse et commerciale, et compacité adaptée au contexte local. Ces éléments révèlent l'organisation et la structuration du tissu urbain, offrant ainsi un terrain approprié pour appliquer la méthodologie combinant analyse fractale, théorie des réseaux, et automates cellulaires, afin de relier dynamiques locales et structures globales du réseau viaire.

4. Contributions attendues de la recherche

Afin de répondre à la problématique posée, cette recherche se propose d'apporter plusieurs contributions complémentaires, couvrant les dimensions théoriques, méthodologiques et empiriques :

- **Contribution théorique**, elle vise à enrichir la compréhension de la morphogenèse urbaine de la ville islamique traditionnelle, notamment en Algérie, en l'inscrivant dans le cadre des théories de la complexité. En mobilisant des notions telles que l'émergence, l'auto organisation, l'invariance d'échelle, la thèse offre une lecture renouvelée des logiques spatiales qui structurent ces tissus urbains. Elle établit un pont entre des règles normatives endogènes (Fiqh, régulations sociales) et des régularités formelles identifiées dans la configuration du réseau viaire.
- **Contribution méthodologique**, l'étude met en place une méthodologie qui combine l'analyse fractale, la théorie des réseaux, et les automates cellulaires pour évaluer la

complexité morphologique des cas d'études. La méthodologie inclut la représentation systématique du réseau viaire sous forme de graphes, le calcul de mesures de centralité et de hiérarchie, la validation statistique des distributions observées (tests de distribution en loi de puissance), ainsi que la simulation dynamique. Cette démarche contribue à renforcer la robustesse des approches quantitatives appliquées aux tissus urbains historiques.

- **Contribution empirique**, à travers l'examen comparatif de quatre villes algériennes : la Casbah d'Alger, la médina de Tlemcen, le ksar de Ghardaïa et le ksar d'Ouargla, la recherche documente la présence éventuelle de signatures fractales et de hiérarchies. Elle permet ainsi de dégager des invariants structurels tout en soulignant les spécificités locales, contribuant à une meilleure compréhension des dynamiques morphogénétiques propres à la ville islamique.
- **Contribution patrimoniale**, enfin, la thèse offre un éclairage scientifique susceptible d'enrichir les démarches de sauvegarde et de réhabilitation des centres historiques. En mettant en évidence la dynamique évolutive qui façonne leur organisation spatiale, elle peut nourrir des stratégies contemporaines d'aménagement respectueuses de la logique interne de ces tissus urbains.

5. Structure de la thèse

Conformément à la méthodologie appliquée, la thèse est organisée en trois parties complémentaires qui s'articulent entre elles :

- **Partie théorique conceptuelle**, regroupe les chapitres 2 et 3. Elle établit le cadre scientifique nécessaire à l'étude en définissant la morphogenèse comme processus générateur de formes et en mobilisant les apports de la science de la complexité. Les notions clés d'émergence, d'auto organisation et d'invariance d'échelle. Elles sont introduites afin de constituer un socle théorique transversal pour l'analyse.
- **Partie contextuelle**, réunit les chapitres 4 et 5. Elle se concentre sur la ville islamique traditionnelle, objet privilégié de l'étude. L'analyse confronte discours et représentations, distingue mythes et réalités, puis met en évidence le rôle central de la rue et du réseau viaire dans la structuration de l'espace. Cette partie ne se limite pas à un cadre descriptif : elle prépare aussi la démarche méthodologique en identifiant les éléments récurrents qui serviront à l'application des outils de la complexité.
- **Partie méthodologique et empirique**, regroupe les chapitres 6, 7, 8 et 9 et mobilise les outils de la complexité : géométrie fractale, théorie des réseaux et automates cellulaires, afin d'examiner leur pertinence pour l'analyse urbaine. Les chapitres 6, 7 et 9 présentent respectivement : les fractales comme modèle de la complexité urbaine ; la théorie des réseaux comme outil de modélisation de la morphogenèse ; et les automates cellulaires comme modèle et instrument de simulation dynamique des processus morphogénétiques. Le chapitre 8 combine l'application de la géométrie

fractale et de la théorie des réseaux à quatre cas d'étude (la Casbah d'Alger, la médina de Tlemcen, le ksar de Ghardaïa et le ksar d'Ouargla), afin de mettre en évidence l'existence de logiques fractales et hiérarchiques dans leurs réseaux viaires. Enfin, le chapitre 9 vient clôturer cette partie en proposant une application fondée sur la simulation par automates cellulaires.

Après avoir présenté l'organisation générale de la thèse en trois grandes parties, il convient désormais d'en préciser la structure détaillée. Chaque chapitre a été conçu de manière à développer progressivement l'analyse, en articulant fondements théoriques, dimensions contextuelles et analyses empiriques. La structure détaillée des chapitres s'articule comme suit :

- **Chapitre 1**, introduction générale. Ce chapitre établit le cadre épistémologique et scientifique de la recherche. Il présente le contexte de l'étude, expose la problématique et la question de recherche, formule l'hypothèse principale, et définit la méthodologie et la structure de la thèse.
- **Chapitre 2**, morphogenèse : forme déterminée par processus. Ce chapitre explore la morphogenèse comme un processus de formation et de transformation des formes. Il montre comment ce concept, issu de diverses disciplines, peut s'appliquer à l'étude des formes urbaines pour les comprendre non pas comme des entités statiques, mais comme le résultat d'interactions dynamiques.
- **Chapitre 3**, théories de la complexité et systèmes complexes : fondements et application à la ville. Ce chapitre introduit les théories de la complexité en tant que nouveau paradigme scientifique. Il présente des notions clés comme l'émergence et l'auto-organisation, et justifie pourquoi la ville doit être analysée comme un système complexe, dont la morphogenèse peut être étudiée avec des outils spécifiques.
- **Chapitre 4**, ville islamique traditionnelle, mythes et réalités. Ce chapitre se concentre sur l'objet d'étude principal. Il analyse la ville islamique traditionnelle en distinguant les mythes des réalités observables et propose une relecture de cette ville comme un système complexe, ce qui justifie l'approche méthodologique à venir.
- **Chapitre 5**, rue et réseau viaire : éléments structurants et support méthodologiques. Ce chapitre met en évidence le rôle central de la rue et du réseau viaire dans la structuration de l'espace urbain. Il explique pourquoi ce réseau sera utilisé comme support méthodologique pour appliquer les outils de la complexité à l'analyse de la morphogenèse.
- **Chapitre 6**, fractales et morphogenèse urbaine : modèle de la complexité. Ce chapitre présente la géométrie fractale comme un outil pertinent pour modéliser la complexité urbaine. Il explique les concepts d'autosimilarité et d'invariance d'échelles, et leur application à l'analyse de la morphogenèse des villes.

- **Chapitre 7**, modélisation de la morphogenèse urbaine par la théorie des réseaux : méthode de la complexité. Ce chapitre introduit la théorie des réseaux comme une autre méthode pour analyser la morphogenèse urbaine. Il montre comment elle peut révéler les logiques d'organisation cachées derrière l'apparence des tissus urbains via des concepts comme la centralité et la hiérarchie.
- **Chapitre 8**, invariance d'échelle du réseau viaire traditionnel : propriété morphogénétique de la complexité. C'est le chapitre de l'analyse empirique. Il applique les outils des chapitres 6 et 7 à quatre cas d'étude de villes algériennes (la Casbah d'Alger, la médina de Tlemcen, le ksar de Ghardaïa et le ksar d'Ouargla). Les analyses statistiques vérifient l'existence de propriétés fractales et hiérarchiques dans leurs réseaux viaires, confirmant ainsi l'hypothèse de la recherche.
- **Chapitre 9**, Simulation morphogénétique par automates cellulaires : modèle expérimental de la complexité. Ce chapitre met en évidence que les automates cellulaires permettent de simuler la morphogenèse urbaine en modélisant l'émergence de formes complexes à partir de règles locales simples. Complémentaires aux approches fractales et aux analyses de réseaux, ces simulations offrent une lecture dynamique et intégrée des processus morphogénétiques urbains.
- **Chapitre 10**, conclusion générale. Ce chapitre synthétise les principaux résultats de la thèse. Il souligne les contributions théoriques et méthodologiques du travail et identifie les limites de l'étude ainsi que les pistes pour des recherches futures.

6. Limites et perspectives de la recherche

Cette recherche présente néanmoins certaines limites qu'il convient de reconnaître. Tout d'abord, la portée des cas étudiés reste limitée : l'analyse s'appuie sur quatre villes algériennes : la Casbah d'Alger, la médina de Tlemcen, le Ksar Ghardaïa et le Ksar de Ouargla. Bien qu'elles soient représentatives de contextes historiques et géographiques variés, elles ne reflètent pas la diversité complète des villes islamiques. Les résultats obtenus doivent donc être interprétés avec prudence, non comme généralisables à l'ensemble des villes islamiques traditionnelles. Ensuite, la nature des données mobilisées impose ses propres contraintes. Les analyses reposent en grande partie sur des relevés cartographiques dont la précision peut varier selon les époques et les conditions de production. Les choix de numérisation, les résolutions graphiques influencent inévitablement la qualité des mesures fractales et des indicateurs de réseau, introduisant un degré d'incertitude il est nécessaire de rappeler. Enfin, la démarche méthodologique adoptée, centrée sur l'application de la géométrie fractale, de la théorie des réseaux, et des automates cellulaires bien qu'efficace pour mettre en évidence des régularités morphologiques, demeure partielle. Elle ne rend pas compte de l'ensemble des dimensions sociales, économiques, politiques et symboliques qui participent à la morphogenèse urbaine et qui, pour être pleinement intégrées, nécessiteraient une approche pluridisciplinaire croisant les analyses quantitatives avec des enquêtes qualitatives et historiques approfondies.

Ces limites ouvrent plusieurs pistes de recherche futures. Tout d'abord, une extension comparative à d'autres villes islamiques, qu'elles soient situées au « *Maghreb* », au « *Machrek* » ou encore en Andalousie, permettrait de tester la robustesse des résultats et de déterminer si les caractères observés constituent des traits communs ou des particularités locales. Sur le plan méthodologique, l'approche pourrait être enrichie par l'intégration d'autres mesures fractales, telles que la dimension fractale, la multifractalité, afin de mieux caractériser la complexité et l'hétérogénéité des structures urbaines. L'analyse pourrait aussi s'élargir à d'autres composantes de la morphologie, notamment l'espace bâti et l'articulation des pleins et des vides, pour compléter la lecture centrée sur le réseau viaire et proposer une vision plus globale de la structure urbaine. De plus, l'usage d'autres types de graphes, qu'il s'agisse de représentations duales, axiales ou leurs variants, associé à une diversité d'indicateurs complémentaires, permettrait d'explorer différents aspects de l'organisation spatiale et de confronter les résultats entre approches. Enfin, l'adoption d'autres outils des théories de la complexité, comme la simulation multi-agents, les dynamiques non linéaire, l'entropie..., offrirait une perspective prometteuse pour relier plus finement les règles locales d'aménagement aux formes émergentes de la ville, et ainsi mettre en lumière le lien entre pratiques sociales et signatures morphologiques mesurées.

. Notes et références bibliographiques

¹ On entend par « paradigme », la définition et l'approche développée par Thomas Kuhn dans *La structure des révolutions scientifiques* (1972, Flammarion, traduction de Laure Meyer). Kuhn définit le paradigme comme l'ensemble des croyances, valeurs, méthodes et modèles partagés par une communauté scientifique, qui orientent la manière dont elle perçoit, formule et résout les problèmes. Il ne s'agit pas d'une simple théorie isolée, mais d'un cadre global qui fixe les règles de la recherche légitime, les méthodes acceptées et les questions jugées pertinentes. Le paradigme agit ainsi comme une grille de lecture collective, structurant la pratique scientifique. Lorsque ce cadre rencontre des anomalies qu'il ne peut plus expliquer, il entre en crise et peut être remplacé par un nouveau paradigme. Le changement de paradigme correspond donc à la substitution d'un cadre global par un autre, entraînant une redéfinition des valeurs, des méthodes et des questions fondamentales de la recherche.

Weber, M. (1995). *Économie et société* (Tome 1, Trad. J. Freund, J. Chavy & É. de Dampierre). Paris : Pocket. (Œuvre originale publiée en 1921).

George, P., et Verger, F. (2004). *Dictionnaire de la géographie* (8e éd.). Paris : Presses universitaires de France.

Pumain, D. (2006a). Villes et systèmes de villes dans l'économie. *Revue d'économie financière*, 86(5), 29–46. <https://doi.org/10.3406/ecofi.2006.4196>.

Lévy, J., et Lussault, M. (dir.). (2013). *Dictionnaire de géographie et de l'espace des sociétés*. Paris : Belin.

Kostof, S. (1991). *The city shaped: Urban patterns and meanings through history*. London : Thames & Hudson.

Mumford, L. (1961). *The city in history: Its origins, its transformations, and its prospects*. New York, NY: Harcourt, Brace & World.

Ibn Khaldoun. (1978). *Discours sur l'histoire universelle (Al-Muqaddima)*. Traduction, préface et notes par Vincent Monteil. Paris : Sindbad.

Secchi, B. (2011). *Première leçon d'urbanisme* (P. Ingallina, Trad.). Marseille : Édition Parenthèses [Collection Eupalinos].

Douady, C.-N. (2014). *De la trace à la trame : La voie, lecture du développement urbain*. Paris : L'Harmattan.

- West, G. (2017). *Scale: The universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies* [Ebook edition]. Penguin Press.
- Bourdin, S., Paoli, M., et Reltgen-Tallon, A. (2015). *La forme de la ville de l'Antiquité à la Renaissance* [Édition numérique]. Presses universitaires de Rennes.
- Conzen, M. R. G. (1960). *Alnwick, Northumberland: A study in town-plan analysis* (Institute of British Geographers Publication 27). London : George Philip.
- Muratori, S. (1959). *Studi per una operante storia urbana di Venezia I*. Rome : Istituto Poligrafico dello Stato, Libreria dello Stato.
- Caniggia, G., et Maffei, G. L. (2001). *Architectural composition and building typology: Interpreting basic building*. Florence : Alinea Editrice.
- Panerai, P., Castex, J., & Depaule, J.-C. (1997). *Formes urbaines, de l'îlot à la barre*. Paris, France: Éditions Parenthèses [Collection Eupalinos / A+U].
- Lynch, K. (1969). *L'image de la cité*. Paris : Dunod.
- Rossi, A. (2006). *L'architecture de la ville*. Gollion : Infolio. [Collection Archigraphy].
- Nasser, N. (2002). Islamic urbanism: The state of the art. *Built Environment*, 28(3), 172–186. Alexandrine Press. <http://www.jstor.org/stable/23288450>.
- Merlin, P., et Choay, F. (Éds.). (1996). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement* (2^e éd.). Paris : Presses Universitaires de France - PUF.
- Raymond, A. (1994). Islamic city, Arab city: Orientalist myths and recent views. *British Journal of Middle Eastern Studies*, 21(1), 3–18. <https://www.jstor.org/stable/195564>.
- Oliveira, V. (2016). *Urban Morphology: An Introduction to the Study of the Physical Form of Cities*. Cham: Springer.
- Lévy, A. (2015). La forme urbaine comme forme complexe : Une introduction à la morphologie urbaine. Dans S. Franceschelli, M. Gribaudi & H. Le Bras (Dir.), *Morphogenèse et dynamiques urbaines : Les ateliers de morphologie EHESS-EnsAD* (pp. 20–35). Lyon : PUCA.
- Franceschelli, S., Gribaudi, M., & Le Bras, H. (2015). Introduction. Dans S. Franceschelli, M. Gribaudi & H. Le Bras (Dir.), *Morphogenèse et dynamiques urbaines : Les ateliers de morphologie EHESS-EnsAD* (pp. 11–17). Lyon : PUCA.
- Gauthier, B. (2003). *Espace urbain, vocabulaire et morphologie*. Paris : Éditions du Patrimoine.
- Plazanet, C., et Berger, P. (2008). *Morphogenèse de la métropole : Rapport final* [Projet de recherche interdisciplinaire EPFL / VPAA / Fonds 590612]. Lausanne, Suisse : EPFL, laboratoire UTA.
- Lesne, A., & Bourguin, P. (2006). Introduction. In P. Bourguin & A. Lesne (Eds.), *Morphogenèse : L'origine des formes* (pp. 13–26). Paris : Éditions Belin.
- Tort, P. (1996). *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*. Paris : Presses Universitaires de France -PUF.
- Roudavski, S. (2009). Towards morphogenesis in architecture. *International Journal of Architectural Computing*, 7(3), 345–374. <https://doi.org/10.1260/147807709789621266>.
- Sharpe, C. A. (1986). The teaching of urban morphogenesis. *Canadian Geographer*, 30(1), 53–59. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.1986.tb01025.x>.

- Batty, M. (2013). *The new science of cities* [eBook edition]. Cambridge, MA: MIT Press.
- Portugali, J. (2000). *Self-Organization and the City* [eBook edition]. Berlin: Springer-Verlag.
- Holland, J. H. (2014). *Complexity: A very short introduction* [E-book edition]. Oxford University Press.
- Jiang, B. (2015). A city is a complex network. In M. W. Mehaffy (Ed.), *Christopher Alexander: A city is not a tree: 50th anniversary edition* (pp. 89–100). Portland, OR: Sustasis Press.
- Balmaceda, B., et Fuentes, M. A. (2016). Cities and methods from complexity science. *Journal of Systems Science and Complexity*, 29(5), 1177–1186. <https://doi.org/10.1007/s11424-016-6084-2>.
- Portugali, J. (2012). Complexity theories of cities: Achievements, criticism and potentials. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), *Complexity theories of cities have come of age* (pp. 47–62). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_4.
- Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude : Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste* [Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d'Azur, Nice].
- Batty, M. (2005). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Dauphiné, A. (2011). *Géographie fractale : Fractals auto-similaire et auto-affine*. Paris : Hermès-Lavoisier.
- Basili, L. L. (1998). The fractal geometry of urban organisation: Beyond the crisis of 'spontaneous order'. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 267–295). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_8.
- Mandelbrot, B. (1982). *The fractal geometry of nature*. San Francisco: W. H. Freeman.
- Pumain, D. (1998). Urban research and complexity. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 323–337). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_10.
- Allen, P. M. (2005). *Cities and regions as self-organizing systems: Models of complexity* (eBook ed.). Taylor & Francis e-Library.
- Batty, M., et Longley, P. (1994). *Fractal cities: A geometry of form and function* [eBook edition]. Academic Press.
- Hamaina, R., Leduc, T., & Moreau, G. (2012). Caractérisation des tissus urbains à partir de l'analyse structurelle des réseaux viaires. *Cybergeog*, (581). <https://doi.org/10.4000/cybergeog.25009>.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour* [eBook]. Oxford University Press.
- Liu, Y. (2009). *Modelling urban development with geographical information systems and cellular automata*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Marshall, S., Gil, J., Kropf, K., Tomko, M., & Figueiredo, L. (2018). Street network studies: From networks to models and their representations. *Networks and Spatial Economics*, 18(3), 735–749. <https://doi.org/10.1007/s11067-018-9427-9>.
- Akbar, J. A. (2021). *Crisis in the built environment: The case of the Muslim city* (2nd ed.) [E-book]. Insan Publications.
- Petrucchioli, A. (2007). *After amnesia: Learning from the Islamic Mediterranean urban fabric*. Bari : ICAR.

- Neglia, G. A. (2008). Some historiographical notes on the Islamic city with particular reference to the visual representation of the built city. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The City in the Islamic World* (Vol. 1, pp. 1–46). Leiden: Brill. <https://doi.org/10.1163/ej.9789004162402.i-1500.6>.
- Abu-Lughod, J. L. (1987). The Islamic city: Historic myth, Islamic essence, and contemporary relevance. *International Journal of Middle East Studies*, 19(2), 155–176. <https://doi.org/10.1017/S0020743800031822>.
- Raymond, A. (2008). The spatial organization of the city. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The City in the Islamic World* (Vol. 1, pp. 47–70). Leiden: Brill. <https://doi.org/10.1163/ej.9789004162402.i-1500.15>.
- Devoulx, A. (1870). *El Djazaïr: histoire d'une cité d'Icosium à Alger* (B. Belkadi & M. Benhamouche, Eds.). Alger: ENAG.
- Cottureau, J. (1930). La maison mauresque. *Chantiers nord-africains*, 2(6), 531–609. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k97419498>.
- Marçais, G. (1957). *Mélanges d'histoire et d'archéologie de l'Occident musulman*. Alger: Direction des Beaux-Arts.
- Akbar, J. A. (1994). Is there an Islamic city? *Journal of Architecture and Planning*, 6, 3–28. https://cap.ksu.edu.sa/ar/JAP_vol6.
- Allain, R. (2004). Morphologie urbaine : Géographie, aménagement et architecture de la ville (Coll. U Géographie). Paris : Armand Colin.
- Al-Lahham, A. (2004). Orientalism in the readings of Muslim built environments. *Journal of Architecture and Planning*, 16, 95–174. https://cap.ksu.edu.sa/ar/JAP_vol16.
- Al-Hathloul, S. (1981). *Tradition, continuity and change in the physical environment: The Arab-Muslim city*. [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].
- Akbar, J. A. (1984). *Responsibility and the traditional Muslim built environment* [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].
- Hakim, B. S. (1986). *Arabic Islamic cities: Building and planning principles*. London: Routledge.
- Ben Hamouche, M. (2009). Can chaos theory explain complexity in urban fabric? Applications in traditional Muslim settlements. In K. Williams (Ed.), *Nexus network journal* (Vol. 11, No. 2). Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8976-5_6.
- Ben Hamouche, M. (2011). Fractal geometry in Muslim cities: How succession law shaped morphology. *Nexus Network Journal*, 13(2), 235–251. <https://doi.org/10.1007/s00004-011-0062-8>.
- Dauphiné, A. (2003). *Les théories de la complexité chez les géographes*. Paris : Anthropos (Économica).
- Sokal, A. D., et Bricmont, J. (1999). *Fashionable nonsense: Postmodern intellectuals' abuse of science* [Ebook edition]. Picador.
- Fankhauser, P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Paris : Anthropos (collection « Villes »).
- Boeing, G. (2018a). Measuring the complexity of urban form and design. *Urban Design International*, 23(4), 281–292. <https://doi.org/10.1057/s41289-018-0072-1>.
- Dauphiné, A. (2011). *Géographie fractale : Fractals auto-similaire et auto-affine*. Paris : Hermès-Lavoisier.

Salingaros, N. A., Coward, L. A., West, B. J., et van Bilsen, A. (2005). *Principles of urban structure*. Amsterdam: Techne Press.

Mrvar, A., & Batagelj, V. (2016). Analysis and visualization of large networks with program package Pajek. *Complex Adaptive Systems Modeling*, 4(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s40294-016-0017-8>.

Clauset, A., Shalizi, C. R., & Newman, M. E. J. (2009). Power-law distributions in empirical data. *SIAM Review*, 51(4), 661–703. <https://doi.org/10.1137/070710111>.

Virkar, Y., & Clauset, A. (2014). Power-law distributions in binned empirical data. *Annals of Applied Statistics*, 8(1), 89–119. <https://doi.org/10.1214/13-AOAS710>.

Groat, L., & Wang, D. (2013). *Architectural research methods* (2nd ed. [eBook edition]). Wiley.

Chapitre 2 : La morphogenèse, émergence de la forme par le processus

« Ce qui est réel, c'est le changement continu de forme : la forme n'est qu'un instantané pris sur une transition... »

Henri Bergson

« La forme... plonge dans la mobilité du temps ... elle résulte d'une série d'expériences... »

Henri Focillon

. Introduction

Depuis l'Antiquité, la ville se distingue par une forme à la fois matérielle et symbolique. Comprendre cette forme, ses origines et ses mécanismes de transformation constitue un enjeu central des études urbaines (Bourdin et al., 2015, p. 6). Cette interrogation ancienne, formulée dès Aristote, a donné lieu à de multiples théories et modèles visant à saisir la complexité des formes urbaines (West, 2017, p. 196). Comme le rappelle Dauphiné (2003, p. 18-19), le terme forme est un mot commun polysémique et revêt des significations spécifiques selon les disciplines, ce qui en fait un concept central dans la pensée scientifique. Dans les cultures antiques, la forme occupait une place essentielle, notamment dans les mathématiques, alors dominées par la géométrie. Cette vision a été éclipsée après Newton, lorsque l'attention s'est déplacée vers l'analyse des forces et du mouvement. Toutefois, depuis le XXe siècle, on assiste à un renouveau des sciences. La description des formes et l'analyse de leur genèse occupent désormais une place centrale dans plusieurs disciplines, de la biologie à la physique, en passant par l'architecture et les études urbaines. Ce regain d'intérêt pour la forme s'exprime notamment dans l'analyse des formes urbaines, où la morphogenèse apparaît comme un cadre théorique central. Au cœur de ces approches, un enjeu transversal demeure : comprendre comment les formes évoluent, quels mécanismes les produisent et comment elles acquièrent stabilité et cohérence.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent chapitre, qui ouvre la partie conceptuelle de la thèse consacrée à la morphogenèse urbaine, en particulier celle de la ville islamique traditionnelle en Algérie. En nous appuyant sur les apports des théories de la complexité, nous nous attachons ici à établir les bases théoriques, conceptuelles, et historiques de cette notion. Nous définissons ci-dessous les termes nécessaires pour aborder la recherche. Dans le premier point, nous proposons différentes définitions de la morphogenèse à partir de son étymologie et de ses usages dans plusieurs disciplines scientifiques. Il s'agit ensuite de cerner la notion de forme et des lois qui dirigent son évolution. En troisième point, nous présentons les travaux précurseurs dans le domaine de la morphogenèse, spécialement, ceux qui ont influencé la recherche et ouvert de nouvelles perspectives dans les décennies suivantes. Enfin, nous explorerons les transpositions de la morphogenèse dans les domaines urbain et architectural, en mettant en lumière les potentialités qu'elle offre pour comprendre la formation des formes urbaines dans une perspective systémique.

1. Définition de la morphogenèse

La morphogénèse est un concept utilisé dans de nombreuses disciplines, notamment la biologie, la géologie, la cristallographie, l'ingénierie, les études urbaines, l'art et l'architecture. Cette variété d'usages reflète de multiples interprétations allant du strictement formel au poétique (Roudavski, 2009). Sommairement, Plazanet et Berger (2008, p.11) définissent la morphogenèse comme le processus consistant à créer des formes. Ils affirment que ce terme est principalement utilisé en biologie, en physique, et en géologie. Il indique d'abord les mécanismes naturels producteurs de formes, comme les réactions physiques ou chimiques

donnant aux minéraux des formes et des couleurs différentes ou comparables, l'influence des vents sur la mer ou le désert produisant des ondes, ou encore l'évolution des génomes à l'origine de la diversité des êtres vivants.

1.1. Lexique et étymologie

Le nouveau Petit Robert de la langue française définit morphogenèse comme un nom féminin apparu en 1893, composé de « *morpho* » et de « *genèse* ». Issu initialement du terme morphogénie, qui a été révélé en 1840. En science, il désigne le développement des formes, et des structures caractéristiques d'une espèce vivante (Rey, 2009, p. 1637). Simultanément, le Petit Larousse illustré définit morphogenèse comme un nom féminin provenant de la géomorphologie, indiquant la création et l'évolution du relief terrestre. En embryologie, il signifie le développement progressif des organes au cours de la vie embryonnaire (Jeuge-Maynard, 2010, p. 663).

Dans le dictionnaire du darwinisme et de l'évolution, Tort (1996, p. 3060) premièrement définit la genèse comme la création. Qui depuis des temps fort reculés, représente l'une des interrogations premières de l'homme, et l'image la plus immédiate de l'origine fut celle d'une forme d'abord pétrie ou sculptée. La genèse des formes est un problème central, aussi bien en cosmologie et en sciences de la terre qu'en physique et spécialement en cristallographie. Deuxièmement, Tort (1996, p. 3061) définit la morphogenèse comme l'ensemble des processus qui engendrent les formes. Le terme est apparu au début de la moitié du 19ème siècle, mais c'était souvent morphogénie, son très proche synonyme qui était utilisé.

D'après Larousse étymologique et historique du français, le terme morphogénèse est composé de *morpho*, provenant du grec « *morphé* » signifiant forme, et de *genèse*, provenant du grec « *genesis* » signifiant formation. Apparu en langue française en 1903, mais précédé par morphogénie. Le naturaliste De Blainville en a défini le terme en 1868 comme étude de la forme des êtres vivants (Dubois et al., 2005, p. 635). Selon Roudavski (2009), morphogénie était révélé en 1862 et ses équivalents en langues étrangères étaient « *morphogeny* » en anglais, apparu en 1879, et « *morphogenie* » en allemand, apparu en 1874. L'expression en anglais « *morphogeny* » était antérieure à « *morphogenesis* », qui est aujourd'hui adoptée dans différents domaines scientifiques. De même, Davies (2005, p.3) et Tirico (2020, p. 1-2), affirment que morphogenèse est issu du grec « *morphé* » signifiant forme, et « *genesis* » signifiant création. Littéralement, « commencement de la forme ».

1.2. Définition selon la discipline scientifique

D'après Tort (1996, p. 3061), chaque discipline comporte ses aspects morphologiques et donc morphogénétiques, mais c'est surtout dans les sciences biologiques que les problèmes de forme et de croissance figurent parmi les préoccupations majeures. Néanmoins, cette notion a progressivement dépassé le cadre biologique pour s'étendre à d'autres domaines, tels que la physique, la chimie, la géographie ou encore les sciences sociales. Dans ces disciplines, elle offre un cadre conceptuel permettant de penser l'évolution, la transformation et la complexification des formes dans des systèmes aussi variés que la matière, le territoire ou les structures sociales. Dans cette optique, nous proposons ci-après un aperçu des différentes visions de la morphogenèse selon les principaux champs disciplinaires, afin de mettre en évidence les convergences et différences.

1.2.1. Sciences biologiques

En sciences biologiques, la morphogenèse désigne l'ensemble des mécanismes responsables de la formation reproductible des structures vivantes. Selon Lesne et Bourguin (2006, p. 13), elle correspond aux processus régulant l'apparition de formes organisées, tout en posant la question essentielle de leur fonctionnalité : la structure est-elle cause ou effet de l'organisation biologique ? Davies (2005, p. 3-4) distingue entre un usage large du terme qui englobe divers aspects du développement et un sens plus strict, centré sur la mise en forme des cellules et des tissus. Ce processus, par lequel un organisme complexe émerge d'un œuf fécondé, implique une dynamique quadridimensionnelle (trois dimensions spatiales et une temporelle), rendant sa compréhension particulièrement difficile. Sur un plan systémique plus large, Cambien (2007) rappelle que les sciences biologiques sont considérées comme étant à l'origine du développement de la pensée systémique. Tirico (2020, p. 2-3) prolonge cette perspective en définissant la morphogenèse non seulement comme un processus biologique, mais aussi comme un cadre explicatif plus général du développement des systèmes. Il s'agit d'un ensemble de dynamiques organisationnelles par lesquelles les éléments d'un système interagissent, se structurent et acquièrent collectivement des fonctions. Comprendre un système revient alors à analyser la manière dont sa forme, loin d'être un simple résultat, participe activement à son fonctionnement.

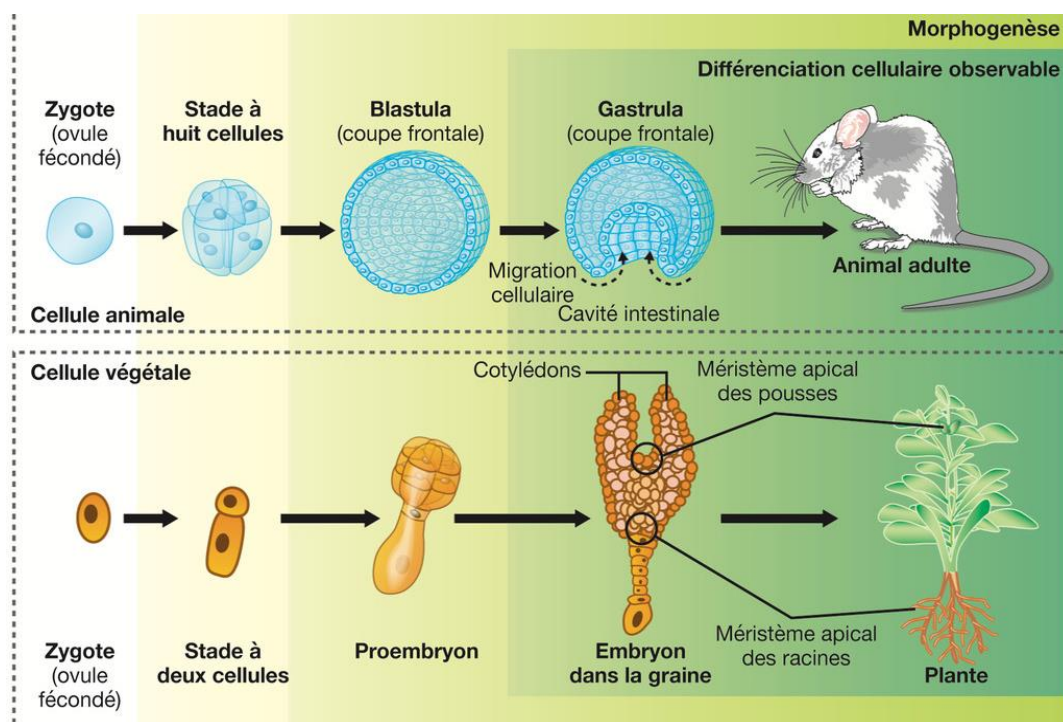


Figure 2.1. Morphogenèse animale et végétale, processus de différenciation cellulaire. Source : Centre collégial de développement de matériel didactique (CCDMD), <https://monde.ccdmd.qc.ca/ressource/?id=119536&demande=desc>, consulté Novembre 2024.

1.2.2. Sciences de la terre

Dans le domaine des sciences de la terre, la morphogenèse renvoie à l'ensemble des processus physiques, chimiques et biologiques responsables de la formation, de la transformation et de l'évolution des formes du relief terrestre. Selon Silva (2010, p. 28), elle concerne spécifiquement les mécanismes qui façonnent l'écorce terrestre, tels que l'érosion, la sédimentation, l'altération ou encore les mouvements tectoniques. Ces processus interagissent

au sein du système géographique dans un équilibre dynamique, souvent décrit comme un cycle géomorphologique, combinant des forces constructives (orogénèse, volcanisme) et destructives (érosion, subsidence), influencées par la gravité, qui tend à niveler les inégalités topographiques en faisant glisser les matériaux des zones élevées vers les dépressions. La morphogenèse terrestre s'inscrit ainsi dans une logique systémique de transformation continue, à la croisée de facteurs multiples. Fortier (2023) identifie quatre grandes catégories de facteurs déclencheurs des dynamiques géomorphologiques : les facteurs géographiques (climat, topographie), biotiques (action de la végétation ou des organismes vivants), géologiques (structure, lithologie, tectonique) et anthropiques (urbanisation, extraction minière, aménagements). L'étude de la morphogenèse en géomorphologie permet alors de comprendre la diversité et l'évolution des paysages terrestres, en intégrant les interactions complexes entre processus naturels et actions humaines.

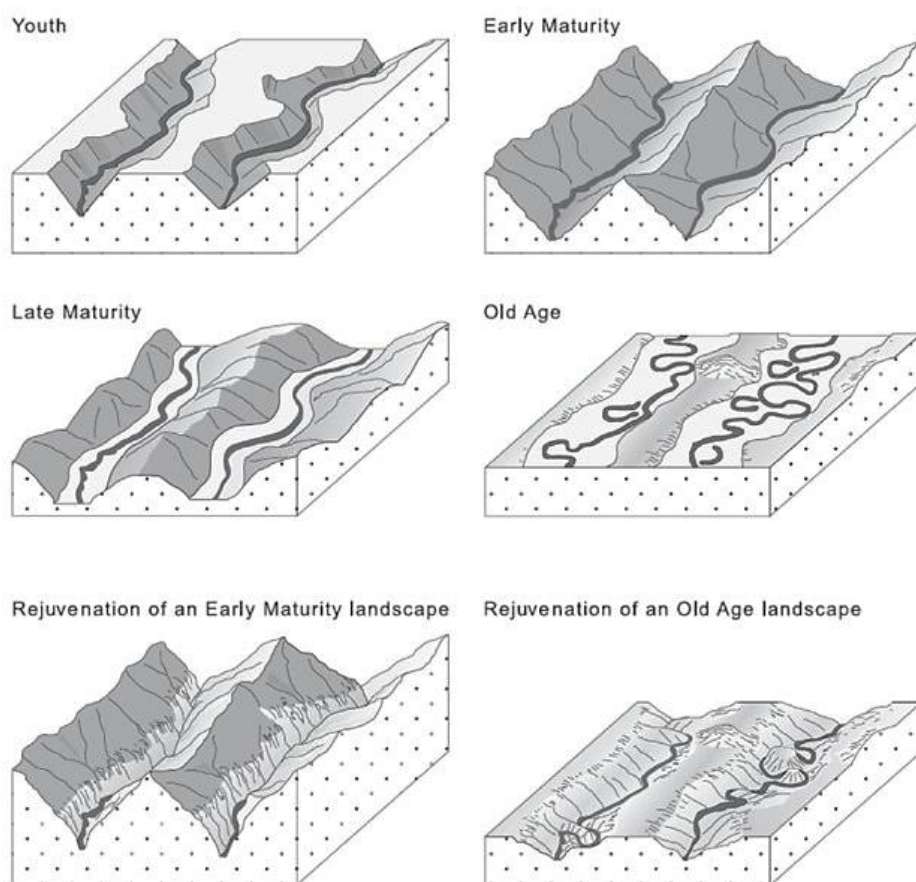


Figure 2.2. Schéma explicatif du processus de morphogenèse terrestre. Source : Pernreiter et al., 2018.

1.2.3. Mathématiques

Aubin et Lesne (2006, p. 309-310) soulignent que la morphogenèse traite l'évolution des formes, lesquelles sont des ensembles au sens mathématique du terme. Par conséquent, l'étude de leur évolution, de leur régulation, de leur analyse, de leur traitement et de leur optimisation exige naturellement une approche intrinsèque. La morphogenèse représente un défi pour les mathématiciens, car les systèmes dynamiques qu'ils ont l'habitude d'étudier évoluent sous forme de vecteurs ou de fonctions régis par des différentielles, alors que la morphogenèse a pour objectif l'étude de l'évolution des formes, c'est-à-dire de sous-ensembles d'un type ou d'un autre, qui ne sont pas nécessairement réguliers. Notamment, Pousse (2020, p. 5) affirme que la morphogenèse revêt une importance encore plus grande dans le domaine du vivant, car

le caractère évolutif des espèces doit être pris en compte. Il s'agit donc de comprendre l'importance du génome et des processus mécaniques dans le développement des espèces. Le physicien cherche à mieux appréhender ces mécanismes, ce qui lui permet de découvrir de nouvelles lois physiques, de les modéliser et de les appliquer à des structures de formes analogues.

1.2.4. Sciences sociales

En sciences sociales, Pretorius (2020) souligne que la morphogenèse est une approche nouvelle, voir, une alternative aux approches évolutionnaires. Elle explique la formation ou le développement d'un système social. Elle fournit aussi une explication et une stratégie de développement fondées sur l'interaction complexe entre les contextes et les personnes agissant dans ces contextes. Certains théoriciens, considèrent les modèles biologiques comme des métaphores appropriées pour comprendre la société. De son côté, Maccarini (2011, p. 96-102) affirme que la morphogenèse consiste à expliquer l'origine des formes sociales. Ces entités émergentes, avec leurs propriétés, doivent être comprises à partir de leurs origines sociales, ce qui nécessite une méthodologie expliquant dans le temps, pourquoi et comment elles se sont apparues et développées. Également, Archer (2013 p.1-7) définit la morphogenèse sociale comme une approche théorisant une possible transition de l'ordre social, tout en examinant les mécanismes générateurs. Elle doit être considérée comme un processus plus qu'un produit fini. Conjointement, comme présenté dans la figure 2.3, Archer développe un modèle dynamique cyclique de la morphogenèse sociale. Ce modèle est composé de deux variables, domaine structurel et domaine culturel. Les deux composants sont en synergie et évoluent selon quatre étapes différentes, T1, T2, T3, et T4.

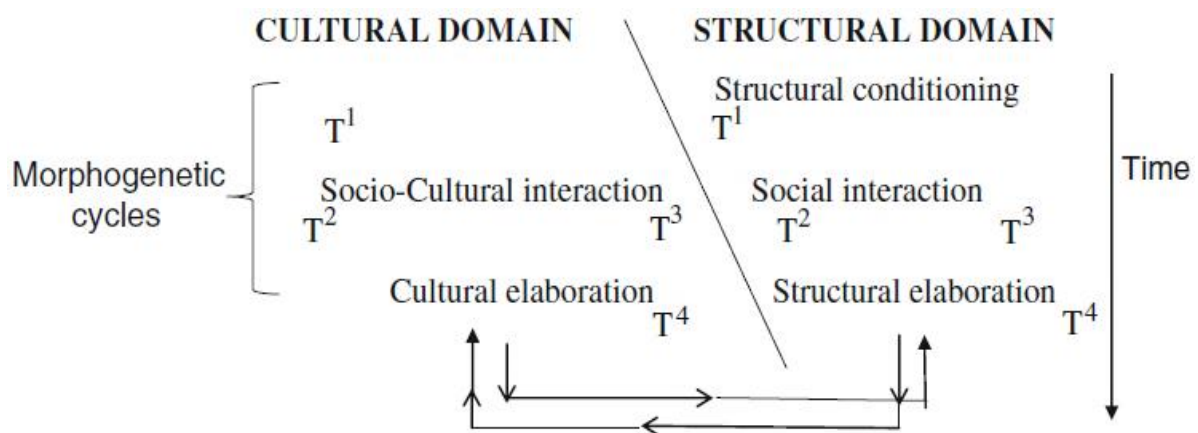


Figure 2.3. Modèle de morphogenèse sociale. Source : Archer (2013).

Ainsi, la morphogenèse ne se limite pas à une seule discipline ; elle traverse des champs variés tels que la biologie, la géologie, la physique ou les sciences sociales. Partout, elle désigne un processus par lequel des formes apparaissent, se transforment et se différencient dans le temps. Cette dynamique, souvent marquée par des évolutions progressives ou discontinues, permet de penser la formation des structures comme le résultat d'interactions internes propres à chaque domaine d'application. Afin de mieux cerner cette logique de formation, il convient désormais d'explorer dans la section suivante, plus en détail les notions clés et les lois à l'origine des formes produites par les processus.

2. Forme générée par processus, notions et lois

Gonod (2014) montre que la notion de forme, d'abord intuitive et issue du langage courant, désigne ce que l'on perçoit immédiatement dans le monde visible : l'aspect ou la configuration des choses. À la fin du XVIII^e siècle, cette notion devient objet de réflexion scientifique, notamment avec Goethe, qui cherche à dépasser une conception statique et descriptive de la forme. Il introduit une approche dynamique, où la forme est comprise comme le résultat d'un processus interne propre au vivant. De là émerge des champs d'études propres à la forme, nommés morphologie, puis morphogenèse, centrés sur les lois de transformation et d'organisation des formes dans le temps. Dans ce même esprit, Schmitt (2001) souligne que cette science cherche à saisir le devenir des formes, notamment végétales, par une méthode fondée sur l'intuition, la comparaison et l'implication active du sujet observateur. Chez Goethe, la forme n'est jamais figée : elle est un moment transitoire du vivant, indissociable de son mouvement interne. Il s'oppose ainsi aux approches mécanistes de son temps, en défendant une vision organique, holistique et qualitative des phénomènes naturels.

En effet, cette conception organique s'est progressivement enrichie au contact d'approches plus analytiques. Dans ce sens, Park (2010, p. 38) rappelle que la compréhension de la morphogenèse nécessite l'articulation de différentes échelles d'explication. Tirico (2020, p. 2), complète cette idée en affirmant que dans l'étude d'une forme, la première étape consiste à rendre la réalité intelligible en codant l'objet à étudier dans un formalisme rigoureux. Par exemple, un objet réel ayant approximativement la forme d'un anneau peut être représenté mathématiquement par un cercle, défini par un centre et un diamètre. Cette formalisation permet de le décrire à l'aide d'une équation et d'un sous-espace du plan cartésien. On accède ainsi à une connaissance factuelle, sous forme d'informations pouvant être classées, résumées et interprétées. Ce savoir déclaratif (savoir que quelque chose est) permet d'identifier certaines propriétés essentielles, comme la symétrie centrale. Toutefois, bien qu'il renseigne sur les caractéristiques observables de l'objet, ce type de savoir reste insuffisant pour en comprendre la forme au sens dynamique, c'est-à-dire le processus qui l'a engendrée. Une connaissance procédurale s'avère alors nécessaire : elle implique un savoir-faire relatif à la manière dont l'objet se constitue et évolue. L'étude de la morphogenèse vise précisément à articuler ces deux types de savoirs, descriptif et procédural, afin de mieux analyser l'objet et de simuler son évolution dans le temps.

Dans une perspective complémentaire, Lesne et Bourguine (2006, p. 13-15) proposent un cadre d'analyse à deux axes :

D'un côté, les grandes situations dans lesquelles les formes apparaissent et évoluent :

- Les formes prescrites par les contraintes et les conditions aux bords.
- Les formes induites par la présence d'une force ou un champ extérieur.
- Les formes émergeant des interactions statiques entre les éléments.
- Les formes émergeant de la dynamique globale.

De l'autre côté, les démarches transdisciplinaires permettant de comprendre les mécanismes de formation :

- La chronologie, l'histoire des concepts et de leurs inventeurs.
- Les types de formes et leur contexte, physique et physico-chimique, biologique (intracellulaire, organisme, populations), ou artificiel.
- Les mécanismes en jeu dans l'apparition des formes. Trois classes sont distinguées : les formes à l'équilibre, les formes transitoires, et les formes hors d'équilibre.
- Les formalismes (modèles) utilisés pour décrire les formes et leur origine.

2.1. Lois génératrices de formes

Les lois et les mécanismes constituent des variables clés dans la genèse des formes. Dans cette logique, et avec une attention particulière portée à la ville, Plazanet et Berger (2008, p. 11–18) confirment que la morphogenèse est régie par des lois. Ils définissent une loi comme une formule générale énonçant une relation constante ou habituelle entre des phénomènes, ou encore comme la désignation des règles de comportement d'un phénomène, relativement invariantes dans le temps et dans l'espace. Ces règles sont souvent simples, bien qu'elles puissent évoluer. Ce sont elles qui conditionnent les transformations de la ville. La ville semble ainsi obéir à des lois d'évolution morphologique : d'une part, elle est constituée de formes anthropomorphiques simples (alignements, carrés, cercles, etc.), issues des logiques d'organisation spatiale propres aux sociétés humaines ; d'autre part, ces invariants formels tendent à se regrouper naturellement en systèmes distincts, selon des processus de complétude, d'extension ou de densification jusqu'à saturation. Ces dynamiques assurent une configuration optimale du point de vue de l'économie d'espace, de matériaux et de relations avec l'environnement. Silva (2010, p.32) en déduit à un niveau conceptuel distingue cinq grands types de lois dans le système urbain :

- Croissance : Apparition de services avec la croissance de la population.
- Stabilité : durée de vie déterminée pour les composants.
- Influence fonctionnelle : attraction ou répulsion entre les programmes (un logement est par exemple attiré par une école ou un commerce), voisinage pouvoir symbolique de certains éléments naturels ou construits (par exemple une montagne ou une cathédrale).
- Contraintes physiques : distance entre voisins, pente, visibilité, exposition au soleil...
- Lois morphologiques : optimisation des formes liées à la répartition spatiale des bâtiments, notamment création de formes régulières, triangles, carrés...

Park (2010, p. 19-38), approfondie cette approche et affirme que l'explication de la morphogenèse à travers des lois permet de concevoir la forme urbaine comme

fondamentalement dynamique. Même si la forme globale de la ville peut paraître complexe, elle peut être représentée comme le résultat d'un processus fondé sur des figures géométriques élémentaires comme : droite, triangle, carré et cercle, où la symétrie apparaît comme la loi structurante et le mot-clé permettant de comprendre la genèse de la forme. La reproduction et la transformation de ces figures simples suivent une dynamique de groupes, régie par quatre lois morphologiques fondamentales de la morphogenèse urbaine : la complétude, l'extension, la densification et la dissociation (voir figure 2.4).

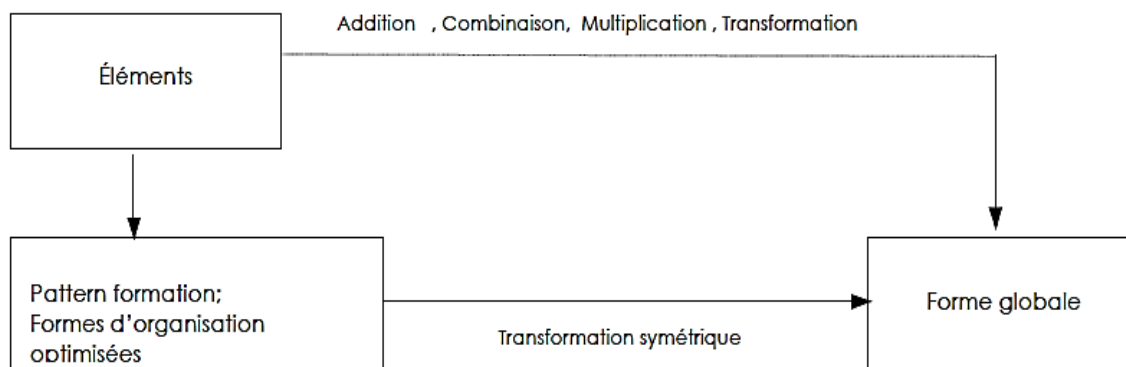


Figure 2.4. Forme globale de la ville selon les lois morphologiques. Source : Park (2010)

2.2. Apports de la complexité à la morphogenèse

Les lois précédemment décrites ne doivent pas être perçues comme des règles fixes, mais comme des invariants dynamiques, se manifestant au sein de systèmes en interaction. À ce titre, les théories de la complexité, explorées dans les chapitres 3,6, et 7, offrent un cadre conceptuel adapté pour comprendre la forme comme un processus émergent, adaptatif et multi-échelle. Dans ce champs inter/transdisciplinaire, la forme n'est pas définie comme un produit fini, mais comme un moment transitoire dans un système en perpétuelle mutation. La morphogenèse devient alors le processus d'auto-organisation par lequel des formes apparaissent sans plan préétabli, à partir d'interactions locales entre éléments simples. Ce cadre mobilise plusieurs notions clés propres à son langage comme :

- L'émergence, qui désigne l'apparition spontanée de structures globales cohérentes à partir des dynamiques de l'interaction locale.
- Les fractales, structures autosimilaires se reproduisant à différentes échelles, souvent issues de processus itératifs, et représentant une forme de complexité géométrique typique des structures urbaines organiques.

En croisant formes, lois de transformation et principes de complexité, la morphogenèse apparaît comme un processus dynamique, où les formes naissent des interactions entre éléments internes, contraintes extérieures, influences contextuelles et répétitions. Ce cadre permet de relier la réflexion théorique à la logique des interactions. Il conduit naturellement à revenir sur les origines historiques et les travaux précurseurs qui ont préparé cette approche et influencé les recherches ultérieures, sujet de la section suivante.

3. Historique et travaux précurseurs

La morphogenèse, bien qu'aujourd'hui enrichie par des outils scientifiques sophistiqués, puise ses origines dans une tradition intellectuelle ancienne. En effet, comme présenté précédemment en section 1, la racine grecque signifiant formation révèle que la morphogenèse suscitait l'intérêt depuis la Grèce antique. Dès lors, les penseurs ont tenté de comprendre les processus à l'origine de la formation des êtres vivants et des structures naturelles. Parmi eux, Aristote se distingue comme un précurseur. Selon Davies (2005, p. 3-4), il aurait décrit les grandes lignes du développement embryonnaire chez les oiseaux et les poissons. Il comprenait déjà que l'œuf contenait le potentiel de la forme future de l'animal, sans qu'elle soit encore formée. Cette intuition marque l'un des premiers questionnements sur les rapports entre potentiel, développement, et forme. Si les interrogations sur la morphogenèse ont traversé les siècles, c'est surtout à partir du XXe siècle, et plus particulièrement depuis les années 1970, qu'elles connaissent une accélération notable (Tort, 1996, p. 3061), poussée par les avancées conjointes de la biologie, de la physique, des mathématiques et des sciences sociales. La suite de cette section retrace, dans un ordre chronologique et pluridisciplinaire, les principales contributions fondatrices de la théorie de la morphogenèse. Ces travaux précurseurs, bien qu'ancrés dans des contextes disciplinaires variés, convergent vers une vision commune de l'émergence de la forme par processus.

3.1. D'Arcy Thompson, « *On Growth and Form* »

Dans son ouvrage avant-gardiste et référentiel de 793 pages intitulé « *On Growth and Form* » publié en 1917, le biologiste et mathématicien D'Arcy Wentworth Thompson a décidé d'identifier le processus de morphogenèse. Il certifie que les formes des organismes biologiques émergent de processus internes en interaction dynamique avec leur environnement (Thompson, 1917). Cette adaptation dynamique, que l'arbre réalise par exemple au cours de sa croissance, donne également lieu à un long et lent processus d'adaptation et d'optimisation des formes à leur milieu. Contrairement à la théorie dominante de la sélection naturelle de Darwin, l'identification par Thompson du processus de morphogenèse a induit un changement radical de paradigme dans la compréhension du fonctionnement du vivant. Marquant ainsi, un renversement d'une approche descendante de classification du vivant et de sélection naturelle darwinienne, vers une approche ascendante d'auto-organisation du vivant à partir de briques élémentaires et d'interactions simples, dont émergent des organismes aux propriétés supérieures (Scheffer, 2017, p. 16-17).

Thompson (1917, p. 10) résume sa méthode et son approche dans cet extrait : « ... *Mon seul but est de mettre en corrélation avec des énoncés mathématiques et des lois physiques certains des phénomènes extérieurs les plus simples de la croissance et de la structure ou de la forme organique, aux fins de cette corrélation, le tissu de l'organisme comme une configuration matérielle et mécanique...* ». Franceschelli (2012, p. 219-220) explique que pour Thompson, la genèse des formes est une question à part entière, qui ne peut pas être réduite à des explications de type purement téléologique. L'une de ses idées fondamentales est que, pour comprendre la morphogenèse, il ne suffit pas de raisonner en termes de sélection naturelle et de mutations aléatoires, mais qu'il faut également prendre en compte les effets de la mécanique et de la physique sur la genèse des formes. Il s'agit alors, d'entreprendre l'étude de transformations structurelles, déterminées par des forces, générant les formes naturelles. C'est pourquoi, selon lui, la science naturelle, à l'image de la physique, devrait emprunter la voie de la mathématisation.

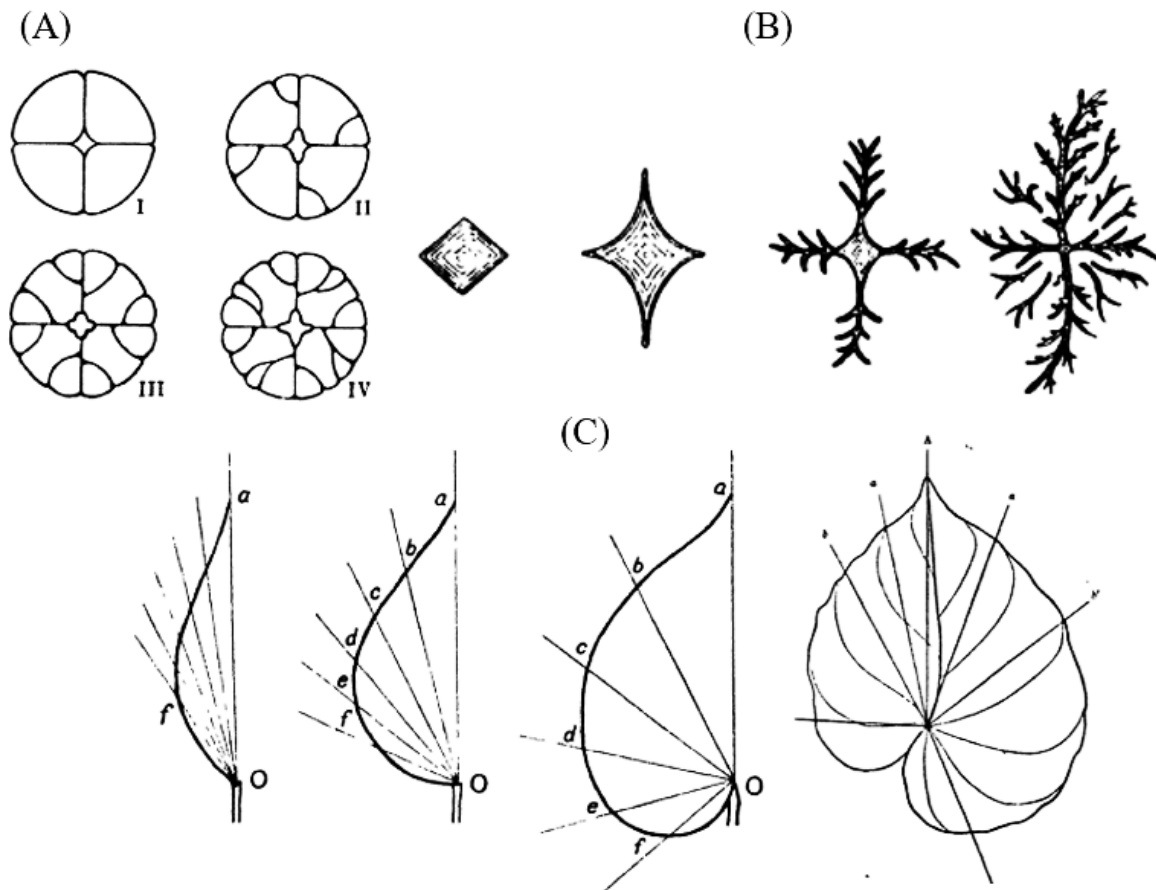


Figure 2.5. Schémas de croissance morphogénétique dans la nature : (A) développement embryonnaire par subdivision symétrique ; (B) Cristallisation arborescente ; (C) croissance différenciée des feuilles. Source : Thompson (1917).

Thompson pensait que l'étude de la forme organique n'est qu'une partie d'une science plus vaste des formes, il énonçait : « ... nous avons tenté d'étudier de la croissance et de la forme, et le rôle que jouent certaines forces physiques dans cette interaction complexe ; et, dans le cadre de la même enquête, nous avons essayé, dans des cas relativement simples, d'utiliser des méthodes mathématiques. Dans des cas relativement simples, d'utiliser des méthodes et une terminologie pour décrire et définir les formes des organismes. Ce faisant, nous avons appris que notre propre étude de la forme organique, que nous appelons morphologie, comme l'a fait Goethe, n'est qu'une partie de cette science plus vaste de la forme qui traite des formes prises par la matière sous tous les aspects et dans toutes les conditions. De la matière sous tous les aspects et dans toutes les conditions, et, dans un et, dans un sens encore plus large, des formes qui sont théoriquement imaginables... » (Thompson, 1917, p. 719). Les travaux de D'Arcy Thompson ont influencé toute une lignée de chercheurs par la suite (Scheffer 2017, p. 17). Il faut également souligner qu'il a posé les bases de la science de la complexité, comme il l'argumentait : « ... Le biologiste, comme le philosophe, apprend à reconnaître que le tout n'est pas seulement la somme des parties. Il est ceci, et bien plus que cela. En effet, il ne s'agit pas d'un ensemble de parties, mais d'une organisation de parties dans leur arrangement mutuel, dans ce qu'Aristote appelle « un principe d'unité unique et indivisible » ; et il ne s'agit pas là d'une conception purement métaphysique, mais c'est, en biologie, la vérité fondamentale qui la base de la loi de Geoffroy ou de Goethe de la « compensation » ou de « l'équilibre de la croissance... ». (Thompson 1917, p. 714).

3.2. Alan Turing, « *The chemical basis of morphogenesis* »

Dans « *The Chemical Basis of Morphogenesis* », article scientifique publié en 1952, le mathématicien Alan Turing développait un modèle mathématique basé sur la chimie pour expliquer le développement des êtres vivants. Ce modèle met en évidence la différenciation d'un organisme à partir d'une seule cellule sphérique (un embryon), au moyen de deux substances chimiques, appelées morphogènes (voir figures), subissant des processus de réaction et de diffusion (Cazzaro, 2020). Turing démontrait le caractère géométrique prévisible de la morphogénèse à partir d'un modèle. Sa démonstration prouve en particulier que ce n'est pas la forme de l'organisme qui est génétiquement codée, mais le processus d'autogénération 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 (Turing, 1952).

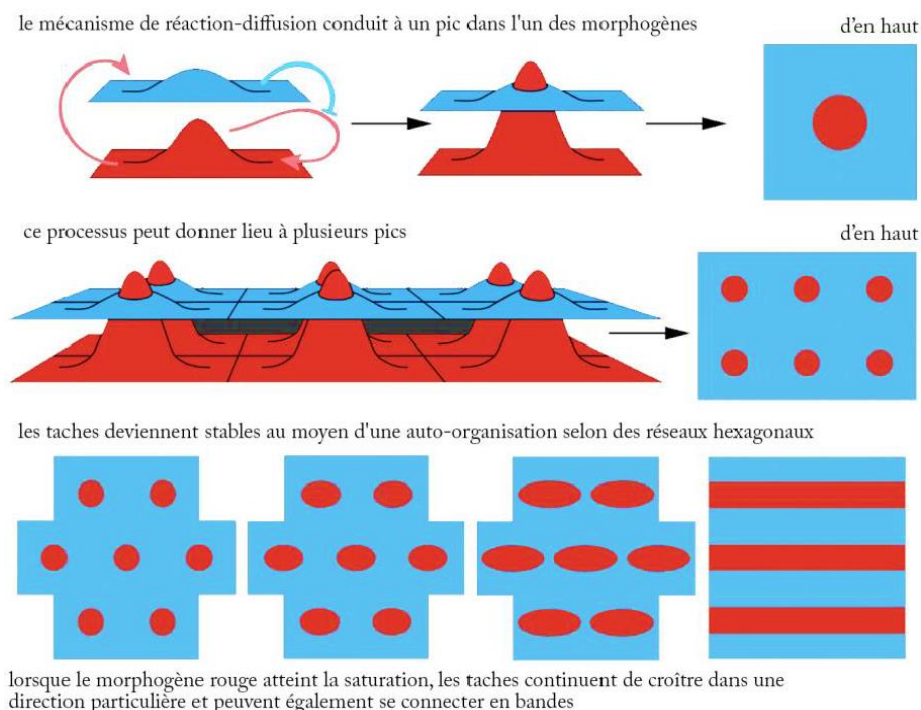


Figure 2.6. Formation des taches et de rayures selon le modèle de Turing. Source : Cazzaro (2020).

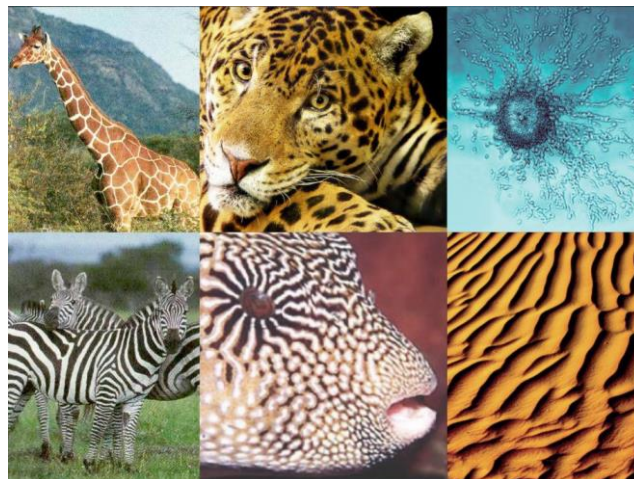
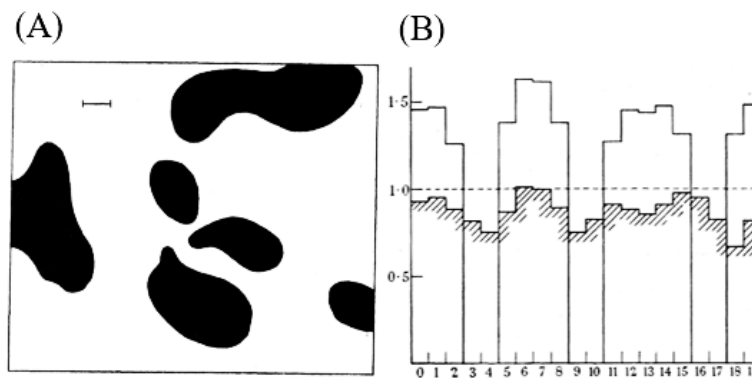


Figure 2.7. Motifs naturels pouvant être décrits avec le modèle de Turing. Source : Cazzaro (2020).

Le modèle de Turing repose sur des équations différentielles non linéaires qui permettent de simuler les interactions entre deux morphogènes diffusant dans l'espace. Ce qui a contribué à formaliser mathématiquement le rôle des morphogènes, c'est-à-dire des molécules diffusantes et régissantes entre elles. Un morphogène isolé n'a pas de sens, car il faut au moins deux molécules pour qu'une réaction chimique se produise. L'ajout de la dimension spatiale avec la diffusion permet donc d'accéder à la dimension temporelle. Les cellules réagissent à un effet de seuil. On assiste également à la mise en place du « *pré-pattern* », à savoir la distribution des morphogènes dans un tissu, qui sous-tend la différenciation des cellules répondant à des pics de concentration. La conclusion est simple : pour comprendre la morphogenèse, il faut avoir accès à ces « *pré-patterns* », qui sont le résultat de deux mécanismes simples de la physico-chimie, à savoir la réaction chimique et la diffusion (Le Guyader, 2008).



Figures 2.8. Formation des motifs par le modèle réaction-diffusion : (A) Motifs générés issus d'un système réaction-diffusion simulé numériquement ; (B) Représentation graphique de la densité du morphogène. Source : Turing (1952)

L'hypothèse de Turing, qui était initialement un modèle mathématique abstrait et schématique destiné à expliquer les phénomènes biologiques, a été appliqué à différents domaines allant de la production de modèles décoratifs au développement des tissus urbains. En effet, l'interaction entre deux morphogènes peut décrire la dynamique de nombreux systèmes autoorganisés à partir desquels les formes émergent dans l'espace en tant qu'états (dans le temps) d'un système qui peut traverser des genres différents d'équilibre (Cazzaro, 2020). En 1968, le biologiste Aristid Lindenmayer 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 appelés « *L-systems* » (voir figure 6), toujours exploités aujourd'hui en modélisation morphogénétique (Scheffer, 2017, p. 17).

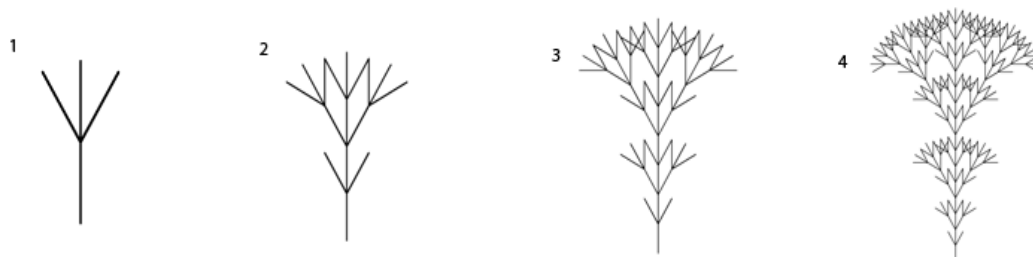


Figure 2.9. Morphogenèse d'un arbre selon le modèle « *L-system* », d'après Lindenmayer (1968), source : <https://igm.rit.edu/~nd/sims/lssystemIndex.html>, consulté en Janvier 2025.

3.3. René Thom, « *Modèles mathématiques de la morphogenèse* »

Selon Petitot (2006), le mathématicien René Thom fut le premier à proposer une théorie mathématique générale des processus morphogénétiques à la fin des années 1960. Bien qu'il ait souvent rappelé que le concept de morphologie demeure fondamentalement phénoménologique, il l'a articulé autour de la notion mathématique de bifurcation. Pour Thom, toute forme émerge d'une rupture de symétrie, définie comme une discontinuité qualitative dans un substrat donné. C'est précisément cette rupture qui constitue le processus morphogénétique proprement dit : elle introduit des différenciations internes et engendre des singularités (Marcos et Morier, 2023). En ce sens, la forme est l'expression visible d'un changement structural du système. Waddington (1989) souligne d'ailleurs que Thom reprend le terme de morphogenèse, couramment utilisé par les biologistes pour désigner le développement des formes reconnaissables à partir des tissus embryonnaires, mais en l'élargissant considérablement. Thom déclare ainsi : « ... *Chaque fois que le point m rencontre K , il y aura une discontinuité dans la nature du système que nous interpréterons comme un changement de la forme précédente, une morphogenèse...* ». Il conçoit donc la morphogenèse comme un concept englobant, qui dépasse le cadre biologique pour inclure les dimensions mathématiques, physiques et technologiques.

Les modèles mathématiques formalisés par Thom dans sa théorie générale de la morphogenèse ont conduit à l'élaboration de la théorie des catastrophes, issue de ses travaux en topologie et en analyse différentielle. Cette théorie permet de modéliser les changements soudains dans des systèmes dynamiques continus et d'identifier différents types de ruptures fondamentales, utiles pour comprendre des phénomènes discontinus observés dans la réalité. Elle a notamment permis la classification des sept catastrophes élémentaires et l'analyse de phénomènes expérimentaux (Franceschelli, 2012, p. 224). Au-delà de ses implications formelles, la pensée de Thom a également influencé une approche sémiotique des formes, en envisageant la morphogenèse comme un processus dynamique de déploiement des configurations symboliques et de transformations qualitatives (Marcos & Morier, 2023).

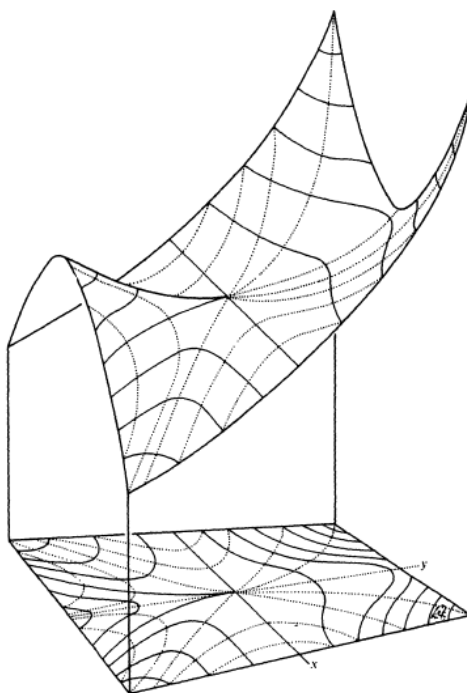


Figure 2.10. Représentation d'une transition de forme. Source : Thom (1989).

3.4. Christopher Alexander, « *Notes on the Synthesis of Form* »

L'ouvrage « *Notes on the Synthesis of Form* » publié en 1964 par Christopher Alexander, est un texte référentiel et fondateur, proposant une théorie générale du design fondée sur une approche rationnelle, analytique et systémique de la conception des formes (voir figures 2.11 et 2.12). Il critique l'incapacité des méthodes traditionnelles et intuitives à faire face à la complexité croissante des problèmes de conception, notamment dans l'architecture, l'urbanisme, l'ingénierie ou le design industriel. Pour répondre à cette complexité, il propose de concevoir le design non comme une création artistique libre, mais comme un processus de résolution de problèmes visant à créer une bonne adéquation « *good fit* » entre une forme (ce que le concepteur maîtrise) et un contexte (ensemble des contraintes fonctionnelles, sociales, techniques, environnementales, etc.). Alexander (1964) insiste sur le fait que cette adéquation ne peut être évaluée uniquement de manière positive ou esthétique. Au contraire, on reconnaît une bonne forme surtout par l'absence de « *misfits* », c'est-à-dire des dysfonctionnements, des contradictions, des erreurs d'ajustement. Il propose de modéliser les problèmes de design comme un ensemble de variables binaires représentant ces misfits potentiels. Le but du concepteur devient alors de réduire progressivement le nombre de ces variables actives à zéro, dans une démarche proche de l'optimisation systémique.

Simultanément, Alexander (1964) oppose deux types de cultures : les cultures non réflexives « *unself conscious* », comme celles des sociétés traditionnelles, et les cultures modernes réflexives « *self conscious* ». Dans les premières, les formes émergent progressivement par imitation, ajustement, expérience et répétition collective. Ces processus, bien qu'informels, produisent souvent des formes robustes et bien adaptées à leur environnement. À l'inverse, les cultures modernes, en détachant la conception de l'usage réel (par l'intervention d'experts, l'usage de styles, de principes ou de règles abstraites), perdent ce lien adaptatif et produisent fréquemment des formes inadaptées. Alexander appelle à dépasser l'opposition entre intuition et méthode, et à outiller la pensée du concepteur pour affronter les défis complexes du monde contemporain. Il développe ainsi une vision du design comme un processus d'évolution structurelle fondé sur des diagrammes « *patterns* » qui permettent de représenter, isoler et résoudre des conflits fonctionnels, et d'aboutir à des formes à la fois cohérentes, évolutives et adaptées.

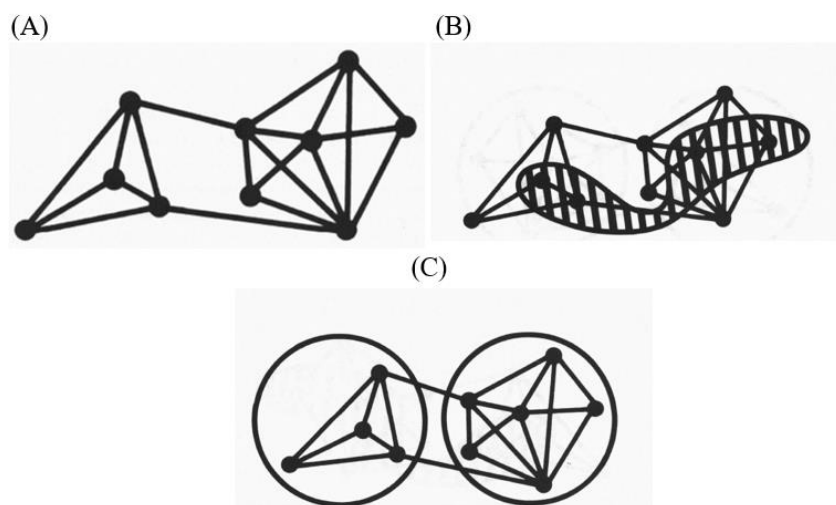


Figure 2.11. Structures de problèmes et sous-systèmes en interaction : (A) Le graphe de connexions entre les éléments d'un système complexe ; (B) La topologie des contraintes et interdépendances ; (C) La décomposition du graphe initial en sous-groupes fortement connectés. Source : Alexander (1964).

L'approche d'Alexander peut être interprétée comme une véritable théorie de la morphogenèse. En effet, il conçoit la forme comme le résultat d'un processus adaptatif entre contraintes et solutions, où celle-ci émerge progressivement à travers des ajustements successifs dans un système dynamique. Selon Mehaffy (2007), la thèse d'Alexander a profondément influencé la pensée morphogénétique, notamment en architecture et en urbanisme. En proposant de concevoir la forme comme l'issue d'un processus d'ajustement progressif entre un système (la forme) et son environnement (le contexte), Alexander anticipe les approches contemporaines de la morphogenèse fondées sur la complexité, l'auto-organisation et les interactions locales. Il rejette les styles arbitraires et les méthodes purement intuitives, pour défendre une conception rationnelle, systémique et évolutive, fondée sur l'identification et la résolution progressive des misfits, ces incompatibilités locales entre forme et usage. Par ailleurs, Jiang (2019) confirme que la méthode d'Alexander, qui décompose les problèmes en sous-systèmes interconnectés et exploitables sous forme de patterns, a jeté les bases d'une approche morphogénétique applicable aux formes bâties, aux villes, et même aux systèmes informatiques, faisant de cet ouvrage un texte pionnier.

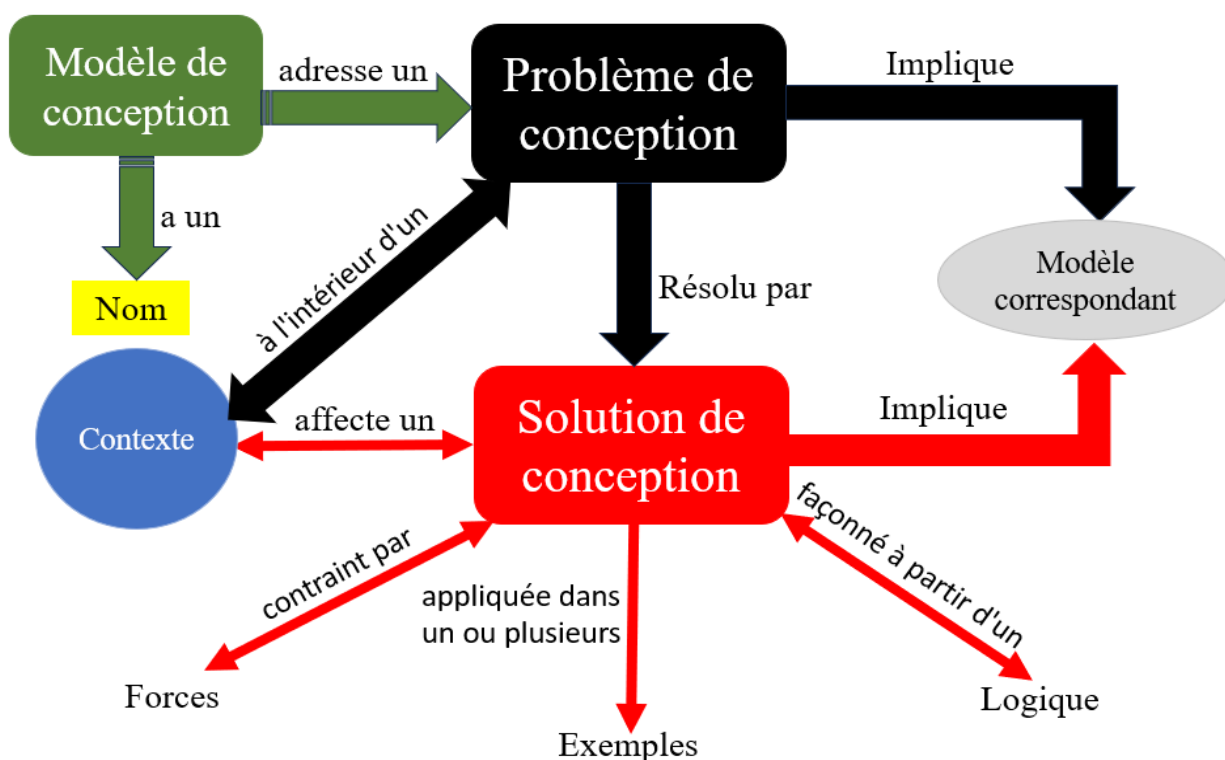


Figure 2.12. La structure conceptuelle du schéma de conception selon Alexander. Source : auteur.

L'exploration des travaux précurseurs de la morphogenèse révèle la profondeur historique et la diversité disciplinaire de ce champ de pensée. Tous convergent vers une conception de la forme non comme donnée statique, mais comme le résultat émergent de processus dynamiques et adaptatifs. Qu'elle soit abordée sous l'angle des lois physiques, des réactions chimiques, des ruptures topologiques ou de l'ajustement fonctionnel, la morphogenèse est pensée comme un processus par lequel la forme se construit, étape par étape, dans un environnement changeant. Ces auteurs ont ainsi posé les bases d'une épistémologie de la forme comme processus, qui dépasse les découpages disciplinaires pour éclairer des phénomènes aussi variés que le développement embryonnaire, la croissance végétale, les transitions de phase... ou encore la conception architecturale et urbaine. Il devient alors pertinent de se demander si ces idées peuvent aussi nous aider à comprendre la

ville, cette forme construite complexe, façonnée par le temps, par les usages et par la société. En tant qu'espace produit par les interactions humaines et les transformations sociales, la ville mérite d'être étudiée comme une forme évoluant par processus. C'est précisément l'objet de la section suivante, consacrée à la morphogenèse urbaine.

4. Morphogénèse urbaine

Les sections précédentes ont permis d'établir les bases conceptuelles et théoriques nécessaires à la compréhension de la morphogenèse. La première section a montré, à travers une approche pluridisciplinaire, que la morphogenèse désigne un processus générateur de formes, à l'œuvre dans des domaines variés. La deuxième section a mis en évidence que la forme n'est pas une donnée figée, mais le produit d'un processus dynamique, gouverné par des lois physiques, biologiques ou sociales, et façonné par un réseau d'interactions multiples. Enfin, l'étude des contributions fondatrices a révélé une conception partagée : celle de la forme comme résultat d'un processus évolutif et adaptatif, issu d'un ajustement permanent entre un système et son environnement. Dans le prolongement de ces fondements, il devient pertinent d'appliquer ce cadre théorique à l'objet urbain. En effet, la ville, matérialisation spatiale de la société humaine, peut également être considérée comme une forme évolutive, façonnée par les usages, l'histoire, les interactions humaines et les contraintes territoriales. Ainsi, elle ne se limite pas à une simple projection planifiée ou à une expression stylistique, elle évolue à travers un processus, où les formes naissent, changent et s'organisent selon des logiques multiples. Étudier la morphogenèse urbaine consiste ainsi à mobiliser les cadres théoriques précédemment développés, afin de mieux comprendre comment les villes prennent forme dans le temps, au croisement de facteurs sociaux, culturels, spatiaux et techniques. Dans cette section nous proposons d'explorer les apports des théories de la morphogenèse à la compréhension de la ville, à travers une lecture croisée des différentes approches.

4.1. Approches classiques descriptives

Globalement, la morphogenèse urbaine correspond aux modalités d'apparition et d'évolution de la ville, vues sous l'angle de la forme (Gauthier, 2003 p. 220). En effet, la forme de la ville était longtemps assimilée à une image simple correspondante souvent à la ville intra-muros, mais son accroissement a rendu ces figures obsolètes (Allain, 2004, p. 50). Dans le domaine des études urbaines, la notion de forme urbaine est prédominante et souvent employée pour aborder les questions de la forme. Il s'agit d'une notion polymorphe et polysémique, elle présente un spectre de significations extrêmement large (Raynaud, 1999). Parallèlement, Lévy (2005), résume les approches traitant la forme urbaine en cinq grandes approches, appelées « cinq registres de forme » :

- L'approche de la forme urbaine comme forme du paysage urbain, c'est-à-dire l'espace urbain visuellement saisi dans sa tridimensionnalité et dans sa matérialité plastique.
- L'approche de la forme urbaine comme forme sociale (ou morphologie sociale), c'est-à-dire l'espace urbain étudié dans son occupation par les divers groupes sociaux, démographiques, ethniques, les types de famille, ou la distribution des activités et des fonctions dans la ville.
- L'approche de la forme urbaine comme forme bioclimatique, c'est-à-dire l'espace urbain étudié dans sa dimension environnementale, comme microclimat (urbain), tant dans ses variations géographiques par quartier, que dans sa diversité liée aux types de

tissus (ouvert/fermé/semi-ouvert), selon l'orientation (héliothermique), selon le site (eau, relief, végétation).

- L'approche de la forme urbaine comme forme des tissus urbains, consiste, l'étude des interrelations entre les éléments composants : parcellaire/viaire/espace libre/espace bâti, constitutifs de tout tissu, en rapport avec le site, ou en focalisant l'analyse sur certains composants particulièrement privilégiés.
- L'approche de la forme urbaine comme forme des tracés urbains renvoie à la forme géométrique du plan de la ville (plan organique/plan géométrique ; plan orthogonal/plan radioconcentrique). Elle renvoie aussi à la notion de composition urbaine et à ses significations.

Toutefois, la forme urbaine est l'objet de la morphologie urbaine, qui est définie comme l'étude de la forme physique de la ville (Merlin et Choay, 1996 p. 488). Allain (2004, p.5) apporte un éclairage complémentaire en précisant que la morphologie urbaine est l'étude de la forme physique de la ville, de la constitution progressive de son tissu urbain et des rapports réciproques des éléments de ce tissu qui définissent des combinaisons particulières, des figures urbaines (rue, place et autres espaces publics...). Cette réalité complexe analysable à différents niveaux d'échelle et de plusieurs points de vue, traverse les cloisonnements disciplinaires. Elle est partagée entre plusieurs savoirs. Par ses aspects théoriques elle se rattache à la géographie urbaine, à l'histoire et à l'architecture. Sous ses formes appliquées, elle est une composante importante de l'urbanisme, mais relève à la fois de l'aménagement urbain et de la composition urbaine. Dans une perspective plus théorique, Moudon (1997) propose une approche structurée de la morphologie urbaine comme discipline scientifique, organisée autour de trois dimensions fondamentales : la forme, la résolution (niveau d'échelle ou de précision), et le temps. Elle identifie trois éléments physiques constitutifs de la forme urbaine, les bâtiments et leurs espaces ouverts, les parcelles, et les rues observables à quatre échelles : la parcelle/bâtiment, la rue/ilot, la ville, et la région. En tant que produit d'une transformation continue, la forme urbaine ne peut être comprise que dans une perspective historique, attentive aux rythmes d'évolution des structures spatiales.

Bien qu'elle soit restée largement centrée sur l'étude des centres urbains anciens, la morphologie urbaine a connu un renouveau depuis les années 1960 grâce aux apports conjoints de la géographie, de l'histoire et de l'architecture, ainsi qu'à l'influence de différentes écoles (Allain, 2004, p.6). Dans cette lignée, Fusco (2018, p.77-80) propose une synthèse des trois grandes traditions de la morphologie urbaine : italienne, britannique et française, en soulignant leur ancrage commun dans l'analyse de la forme physique de la ville et de ses transformations historiques. L'école italienne, représentée par Muratori, Caniggia et Maffei, développe une approche typo-morphologique fondée sur le concept de type architectural comme solution construite répétée, évoluant à travers des variantes synchroniques et diachroniques. Cette analyse, déployée à différentes échelles, de la maison au territoire, met en évidence le rôle structurant des types porteurs dans l'organisation des tissus urbains, en lien avec le parcellaire et le réseau viaire, ce dernier étant considéré comme l'armature morphogénétique principale. L'école britannique, initiée par Conzen, s'intéresse au paysage urbain « *townscape* », composé du réseau viaire, des parcelles, du bâti et des usages du sol. Elle introduit des processus morphogénétiques spécifiques, tels que le « *burgage cycle* » ou les « *fringe belts* », permettant de lire l'évolution progressive des tissus urbains. Quant à l'école française, illustrée par Castex, Panerai et Borie, elle met en avant une dialectique entre une infrastructure stable (tracés, parcelles) et une superstructure plus

évolutive (bâti, vides, végétation), chacune possédant son propre rythme de transformation. Ces approches, bien que riches et détaillées, demeurent souvent qualitatives, monographiques, et centrées sur des formes urbaines historiques, au détriment de l'analyse des dynamiques contemporaines.

Bien que ces approches soient riches, détaillées et rigoureuses, elles demeurent souvent qualitatives et monographiques. Ainsi confirme Tirico (2020, p. 53) que malgré leur contribution évidente à la description des formes urbaines, elles sont de plus en plus remises en question, car elles ne permettent pas d'expliquer pleinement les mécanismes internes de la formation des villes. Lévy (2005) observe d'ailleurs un essoufflement de la recherche en morphologie urbaine, en raison notamment de la prédominance d'une lecture essentiellement historiciste. Or, comme le souligne Roncayolo (2002, p. 178), la forme urbaine ne peut être saisie que par une démarche transversale et pluridisciplinaire, intégrant les apports de plusieurs disciplines pour rendre compte de l'évolution des villes. La morphogenèse urbaine, en ce sens, ne peut se limiter à l'étude de l'évolution historique des seuls éléments physiques. Dans cette perspective, Park (2010, pp. 18–23) propose une relecture dynamique de la morphologie urbaine, à travers la notion de morphogenèse. En effet, une approche statique, fondée sur la typologie, le paysage visuel ou l'analyse du réseau viaire, reste insuffisante pour comprendre les processus d'évolution et les dynamiques qui structurent la ville.

4.2. Approches dynamiques

Les limites des approches classiques ont conduit de nombreux chercheurs à explorer de nouvelles façons d'étudier la formation des formes urbaines. Plutôt que de se contenter d'une description statique de la ville, les approches dynamiques s'intéressent à la façon dont la ville évolue dans le temps. Elles cherchent à comprendre les processus de transformation qui façonnent la ville, en mettant l'accent sur le changement, les interactions, et l'évolution progressive des formes. Cette perspective permet de mieux saisir les formes urbaines, en dépassant une lecture strictement historique ou descriptive. Dans cette perspective Vance (1977) a introduit et développé le concept d'« *urban morphogenesis* » ou morphogenèse urbaine pour décrire la formation et l'évolution des formes urbaines comme un processus historique cumulatif. Il soutient que la morphogenèse urbaine résulte d'une série de changements incrémentaux, imposés et structurés par les négociations entre parcelles individuelles, et que la ville ne part jamais du néant, mais se construit toujours à partir d'un substrat historique. Puis, il prolonge cette perspective en plaçant la morphogenèse urbaine dans une longue durée historique, du monde antique à l'ère contemporaine, en la définissant comme un processus évolutif où les formes anciennes, les nouvelles fonctions économiques, sociales et technologiques interagissent et s'accumulent pour créer l'urbain occidental moderne.

Dans la continuité de Vance, Sharpe (1986) définit la morphogenèse urbaine comme la création et la transformation subséquente de la forme urbaine, simultanément le résultat synergique des processus morphologiques. Elle cherche la signification des changements qui affectent le plan ou l'état d'urbanisme original. Il s'agit d'une approche nouvelle, plus large et plus dynamique d'un vieux problème : comment expliquer l'aspect physique de la ville en tenant compte du rôle joué par l'homme, autant qu'agent du changement de l'environnement bâti. Sharpe insiste sur le fait que cette approche est orientée vers le processus, c'est-à-dire vers l'analyse des transformations au fil du temps, en tenant compte des contextes sociaux, politiques, économiques et culturels dans lesquels les décisions morphologiques sont prises. Il critique la tendance à séparer forme et société, et souligne que la morphogenèse est un outil

essentiel pour comprendre les formes urbaines comme produits d'idéologies, de décisions humaines et d'interactions institutionnelles. Ainsi, étudier la morphogenèse urbaine, c'est réinscrire la forme urbaine dans une lecture historique, sociale et humaine, loin des approches purement descriptives ou normatives de la morphologie classique.

Parallèlement, après sa thèse pionnière de 1964 déjà citée précédemment, Christopher Alexander approfondit sa réflexion sur la morphogenèse urbaine en s'inspirant des processus observés en biologie. Il rejette les approches descendantes et mécanistes de la planification au profit d'un « processus vivant », reposant sur des transformations locales, progressives et contextuelles qui conservent la cohérence du tout. Cette dynamique ascendante permet la génération de formes urbaines à travers des « *patterns* », ou règles génératives, ancrées dans le vécu humain, l'expérience sensible et les caractéristiques du lieu (Alexander, 1977 ; 1979 ; 2001). Selon lui, la morphogenèse désigne l'émergence d'une nouvelle structure par une séquence de transformations successives, où chaque état découle de l'état précédent de manière continue, évolutive et discernable (Porta et al., 2015). Cette vision s'oppose radicalement au modèle rigide, abstrait et externalisé de l'urbanisme moderne. En adoptant une approche phénoménologique, Alexander ne se contente pas d'observer la forme, mais cherche à comprendre comment elle émerge, vit et évolue dans le temps, en lien avec les usages, les perceptions et les valeurs humaines. Il transpose ainsi à l'échelle urbaine les principes de la morphogenèse biologique tels que les formes vivantes, adaptatives et organisées pour repenser la ville comme un système complexe en perpétuelle transformation. Ce cadre théorique, qu'il développe à travers ses écrits tardifs, vise à formaliser les lois profondes de la genèse des formes, fondées sur des transformations locales structurées et sur l'articulation entre ordre, complexité et continuité (Mehaffy, 2015 ; Caliskan, 2013, p. 336–337).

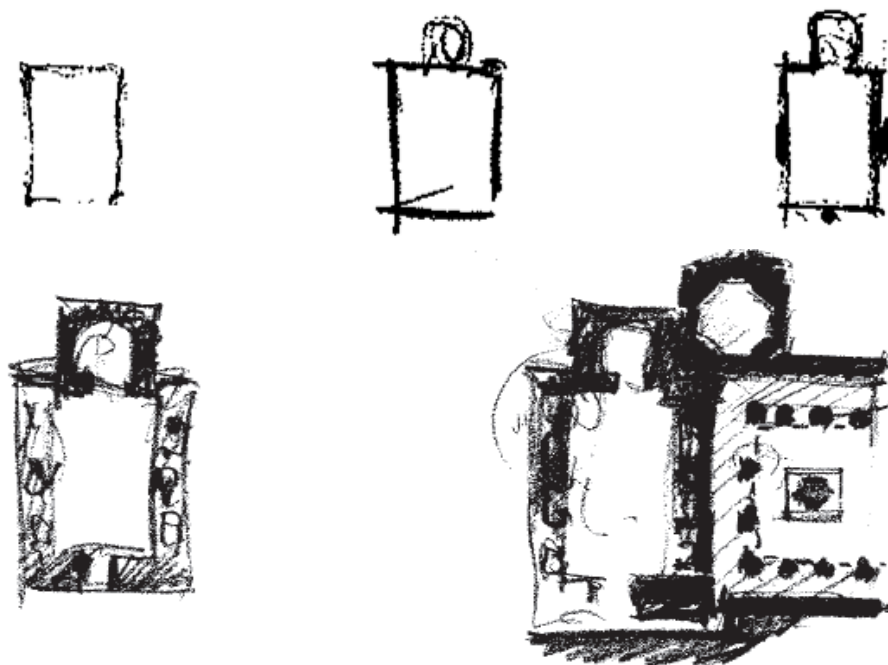


Figure 2.13. Schéma de la monogenèse urbaine sur la base d'un pattern. Source : Caliskan (2013).

En effet, la morphogenèse urbaine est bien influencée par la morphogenèse biologique et géologique. Par analogie, on s'efforce à définir la ville comme organisme et système vivant. En ce sens, Lévy (2012, p. 20) explique : « ... *On ne peut réduire – donc comprendre -*

une forme vivante à son aspect extérieur, son contour, il en va de même pour une forme historique, un artefact historique comme la forme urbaine, qui naît, se développe, grandit..., et meurt. Mais, si la forme humaine est le résultat d'un processus biologique, l'embryogenèse, puis d'un cycle de croissance allant de l'enfance à la vieillesse jusqu'à la mort, la forme urbaine, par contre, comme forme historique est, avant tout, le résultat d'un processus historique. Elle peut être alors saisie, pour son étude, à un stade historique T de son développement, correspondant à une période morphologique où les caractères formels sont reconnus assez stables pour être identifiés comme spécifiques et signifiants de cette période. La morphogenèse urbaine soulève l'épineuse question de la continuité /discontinuité en histoire urbaine, donc de la forme de la ville, qui fait toujours débat ... ».

Récemment au regard des évolutions récentes, Plazanet et Berger (2008, p.11) définissent la morphogenèse urbaine comme processus de création d'ensembles de formes urbaines. Également, la construction ou l'évolution de sa forme physique par les contraintes de l'environnement (pente du terrain, vue, nature ou affectation du sol, proximité ou éloignement d'objets influençant, opportunité...), du niveau local (le bâtiment) au niveau global (l'enveloppe) en passant par le niveau intermédiaire du quartier (la pièce urbaine). Pareillement, Tirico (2020 p. 57), souligne que la morphogenèse urbaine est un processus dynamique dans lequel l'organisation des éléments urbains et la formation des structures observées à l'échelle macroscopique résultent d'interactions microscopiques et de rétroactions entre les niveaux. Comme présenté dans le modèle conceptuel illustré par la figure 2.13, Park (2010 p. 18-38) de son côté définit la morphogenèse urbaine comme processus, aussi, comme approche basée sur la reproduction, transformation, et réorganisation de l'échelle locale à l'échelle globale. La forme de la ville peut se représenter autrement dans ce processus. Ainsi, la forme urbaine sera dynamique et évolutive, et se redéfinisse par sa complexité, son évolution et son optimisation. La question de la morphogenèse peut se reformer comme interrogation sur la cause et les formes que nous observons dans la nature.

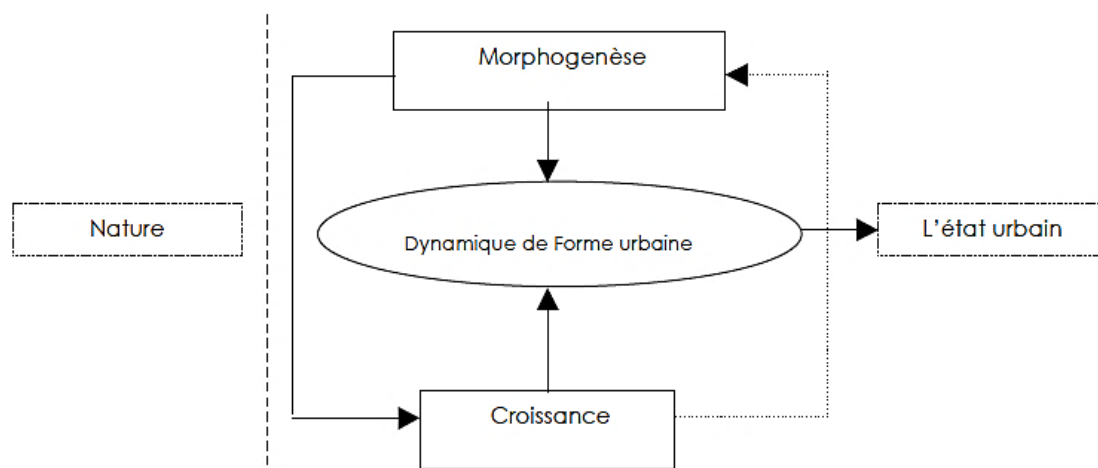


Figure 2.14. Modèle conceptuel de la morphogenèse urbaine schématisant l'interaction entre nature, croissance, et dynamique de la forme urbaine. Source : Park (2010).

Dans le prolongement des approches dynamiques évoquées, Douady (2016, p.11-21) confirme que la ville peut être pensée comme processus, de cette hypothèse, la forme urbaine est définie comme expression transitoire d'un processus spatial évolutif. Les lois simples sont responsables de la complexité de la forme urbaine, dans le processus de genèse coexistent plusieurs logiques simples, discordantes mais agissant simultanément ou successivement. Le réseau viaire figuré par le tracé nous permet d'étudier le processus de morphogenèse urbaine

(voir figure 14). Comme présenté dans la figure 15, ce processus se compose de trois éléments qui sont noyaux, voix de liaison, puis trames locales, et passent par trois étapes successives :

- Dans un premier temps se créent des noyaux urbains répartis à travers le territoire.
- Ces noyaux sont ensuite reliés entre eux par des voies de liaison.
- Des réseaux plus ou moins maillés organisent localement le noyau et son évolution urbaine.

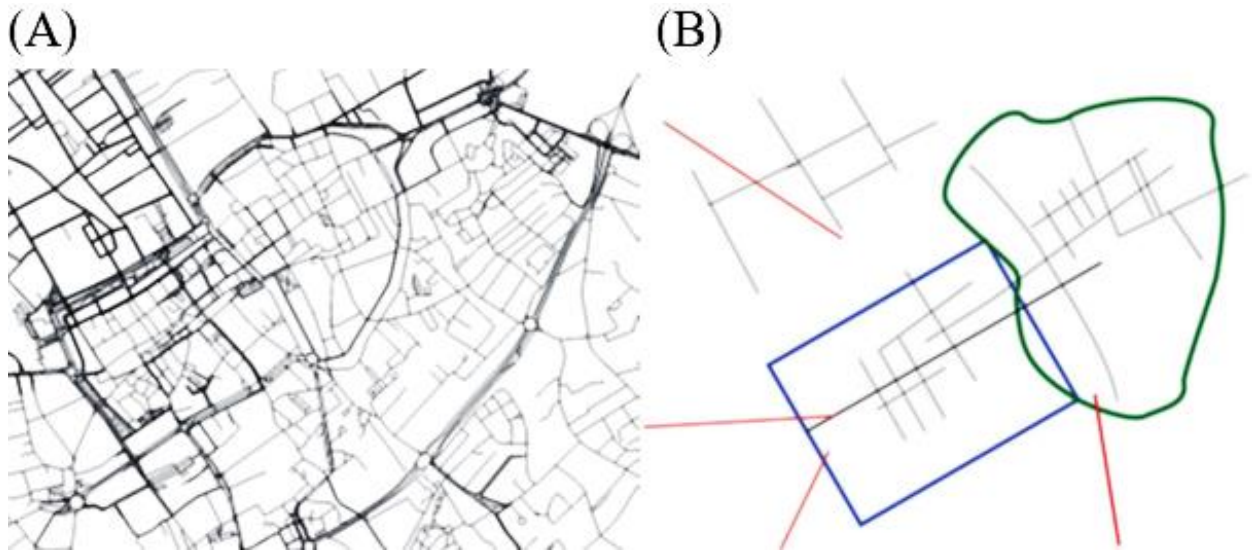


Figure 2.15. Structure urbaine et réseau viaire : (A) Plan d'un fragment d'une ville ; (B) Présentation en réseau de voies. Source : Douady (2016)

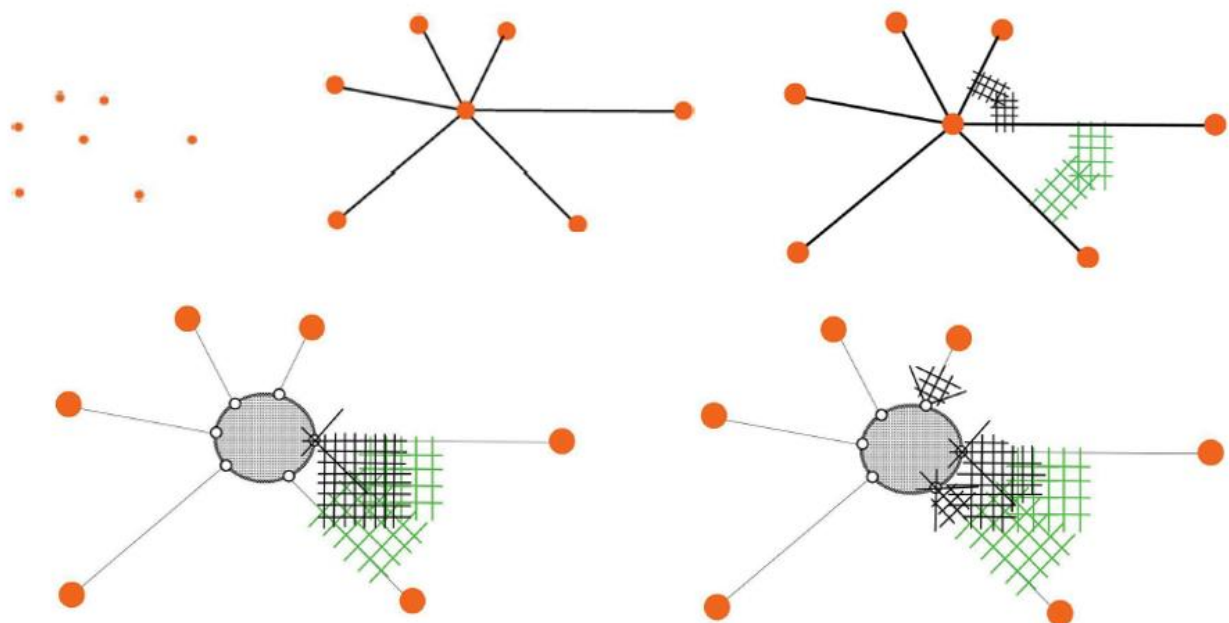


Figure 2.16. Etapes de morphogenèse urbaine à travers le réseau viaire. Source : Douady (2016)

Dans un autre registre et en s'appuyant sur les travaux de René Thom, spécialement ceux concernant la morpho dynamique, Marcos (2012) élabore un modèle de la morphogénèse urbaine selon une approche sémiotique. Selon cette approche, la morphogénèse urbaine est un processus d'optimisation géo historique lié aux conditions de stabilité et d'instabilité, sachant que toute forme tend vers sa condition de stabilité. Une période historique est une condition de stabilité, tandis que les moments entre deux périodes, étant des moments d'instabilité, correspondent à des conditions d'actualisation de la configuration morphologique de la ville. Elle n'est pas conçue et planifiée de l'extérieur par un acteur social, mais elle résulte d'un processus global de stratification spatiotemporelle. En d'autres termes, la morphogenèse est une topologie dynamique qui se précise au fur et à mesure que la forme urbaine et les forces socioculturelles se déploient. La morphogenèse est un processus global de stratification spatiotemporelle (voir figure 2.17) comprenant : Formes concrètes-Strate 3 ; Formes socioculturelles-Strate 2 ; et Formes physico-symboliques -Strate 1.

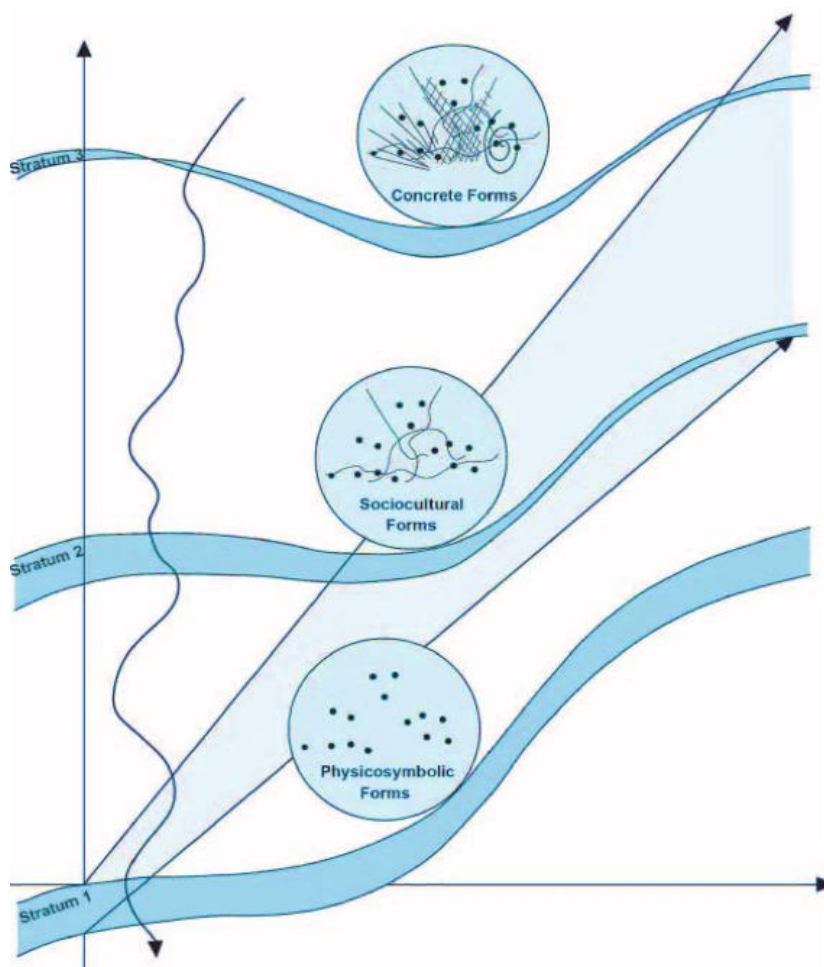


Figure 2.17. La morphogenèse urbaine comme processus global de stratification spatio-temporelle. Source : Marcos (2012)

4.3. La morphogenèse urbaine à travers les théories de la complexité

Les approches dynamiques précédemment présentées ont permis de dépasser les visions statiques de la forme urbaine, en montrant qu'elle évolue dans le temps selon des processus progressifs, contextuels et multi-niveaux. Cependant, comme le souligne Silva (2010, p. 31), les recherches sur la morphogenèse urbaine restent souvent fragmentaires et peinent à dégager

des principes généraux de formation. Pour approfondir la compréhension des mécanismes qui sous-tendent cette transformation, il est pertinent de mobiliser les théories de la complexité. Celles-ci offrent un ensemble cohérent de concepts et de modèles capables de comprendre la ville comme un système complexe, en constante évolution. Dans ce cadre, la morphogenèse urbaine n'est plus perçue comme une simple succession d'étapes, mais comme un processus autoorganisé, où des interactions multiples, locales et globales, donnent lieu à l'émergence de formes et de structures, souvent imprévisibles. Ces théories permettent ainsi de repenser la genèse urbaine dans une logique d'émergence, d'adaptation et d'interdépendance des échelles.

Dans le cadre des théories de la complexité, la morphogenèse urbaine désigne le processus par lequel les formes de la ville émergent et évoluent à partir d'interactions locales, dynamiques et souvent non prédictibles. Elle repose sur une approche interdisciplinaire et transdisciplinaire, mobilisant des apports issus de la physique, de la biologie, de la géographie, de l'urbanisme, et des sciences cognitives. Si cette approche est développée de manière plus approfondie dans les chapitres 3, 6 et 7, il convient ici de présenter brièvement quelques contributions majeures. Premièrement, Batty (2005), à travers des modèles issus de la simulation (automates cellulaires, agents, réseaux), montre que des formes urbaines peuvent résulter de règles locales simples. Il conçoit la ville comme un système adaptatif autoorganisé, où les structures spatiales se forment par agrégation progressive, sans planification centrale, selon des processus de croissance sensibles aux conditions initiales. Salingaros (2005), quant à lui, s'appuie sur une lecture fractale de la ville, où des motifs géométriques simples se répètent à différentes échelles. Soulignant que les villes vivables sont caractérisées par des organisations hiérarchisées, robustes, et adaptatives, en continuité avec les principes d'auto-organisation observés dans les systèmes naturels. Dans son côté Hillier (1996), en se basant sur la théorie des réseaux et spécialement la théorie de la « *Space Syntax* », défend l'idée que la configuration spatiale, notamment le réseau de rues. Selon lui, la forme urbaine ne se limite pas à un support physique, mais constitue une logique spatiale qui guide les usages, les déplacements, et influence la manière dont la ville se développe. Il met en évidence le rôle central des relations topologiques dans la genèse morphologique. Enfin, Portugali (2000) propose une lecture cognitive de la morphogenèse urbaine, en la décrivant comme un processus autoorganisé propre aux systèmes complexes. Il introduit le concept de ville cognitive, où les formes urbaines émergent des interactions entre les habitants, les activités, les représentations mentales et l'environnement spatial. La morphogenèse urbaine y est vue comme une dynamique d'interactions récursives entre forme et usage, influencée par des phénomènes de rétroaction, des effets de sentier « *path-dependence* », et l'intelligence distribuée des acteurs.

Dans la continuité, Wohl (2018) développe une conception de la morphogenèse urbaine profondément ancrée dans les théories de la complexité, en décrivant la ville comme un système complexe adaptatif et autoorganisé. Elle s'attache à montrer que les formes urbaines ne sont pas des produits statiques ou exclusivement planifiés, mais qu'elles émergent progressivement de l'interaction entre des dynamiques sociales, culturelles, économiques et spatiales, à différentes échelles. La morphogenèse est ainsi conçue comme un processus fondé sur des rétroactions, et des lois, où l'ordre émerge de la dynamique entre les composants. Ce cadre théorique lui permet de porter une attention particulière aux villes traditionnelles, qu'elle considère comme des exemples emblématiques de systèmes morphogénétiques réussis : leur forme n'est pas imposée par un plan préétabli, mais résulte d'une accumulation d'adaptations locales, contextuelles et temporelles. En cela, Wohl oppose leur richesse

morphologique et leur cohérence émergente à la rigidité des modèles modernes, et plaide pour une lecture processuelle, historique et relationnelle de l'espace urbain.

5. Morphogénèse et architecture

Après avoir étudié comment les formes urbaines émergent de processus complexes, il devient essentiel d'interroger l'application de ces principes morphogénétiques au domaine architectural. L'architecture, en tant qu'élément constitutif de la ville, ne saurait être pensée comme une entité isolée ou statique : elle participe elle-même à des dynamiques évolutives, où les formes se transforment sous l'effet d'interactions contextuelles, fonctionnelles et culturelles. La section présente examinera comment la notion de morphogenèse peut être transposée à l'échelle architecturale. Il s'agira de montrer en quoi la conception architecturale peut être envisagée non plus comme la projection d'un modèle préétabli, mais comme un processus génératif, inspiré des lois naturelles, biologiques ou computationnelles. Cette approche permet de penser la forme architecturale comme le résultat d'un développement progressif, adaptatif, et souvent autoorganisé, en phase avec les dynamiques complexes du vivant et de l'environnement bâti.

Selon Oxman (2006), la morphogenèse, en tant que processus de génération des formes, offre un cadre conceptuel puissant pour repenser la genèse architecturale au-delà des méthodes traditionnelles de conception. Cadre issue des sciences du vivant, notamment de la biologie du développement, la morphogenèse a été transposée à l'architecture pour décrire les mécanismes par lesquels les formes bâties émergent de l'interaction entre contraintes matérielles, influences environnementales et logiques internes de croissance. L'architecture morphogénétique ne résulte pas d'un dessin imposé de l'extérieur, mais d'un ensemble de conditions initiales et de règles locales, mises en œuvre dans une logique de complexité organisée. Kwinter (2001) complète cette définition en confirmant qu'au-delà de son utilité technique, la morphogenèse constitue une véritable épistémologie de l'architecture, fondée sur la dynamique des formes et la logique des processus. Elle permet de repenser la conception architecturale comme une opération ouverte, sensible aux interactions complexes entre matière, structure et environnement. Ainsi, l'architecte n'est plus seulement un créateur de formes, mais un opérateur de transformations, dont la tâche consiste à activer et orienter des processus génératifs. Cette approche ouvre des perspectives nouvelles pour l'enseignement de l'architecture, en intégrant des méthodes d'exploration non-linéaire, souvent proches de celles utilisées dans les sciences computationnelles et la morphogénétique biologique.

Parallèlement, Hensel et Menges (2006), proposent que la morphogenèse se manifeste notamment par l'intégration des propriétés physiques des matériaux dans le processus de conception. L'architecte devient alors un médiateur entre la matière et la forme, exploitant les comportements intrinsèques des matériaux (pli, tension, courbure...) pour générer des configurations architecturales inédites. Ils plaident pour une morpho-écologie dans laquelle la forme émerge d'une réponse adaptative aux flux d'énergie, aux contraintes structurelles et aux propriétés morpho dynamiques des matériaux. Cette réflexion s'oppose aux approches strictes et normatives de la conception, en mettant l'accent sur la performativité du processus formel. L'essor des outils numériques a considérablement élargi le champ d'application de la morphogenèse architecturale. Les logiciels de modélisation paramétrique, les algorithmes évolutifs et les systèmes génératifs permettent aujourd'hui de simuler des processus morphogénétiques complexes, souvent inspirés de la nature. Les travaux de Weinstock (2010) illustrent cette orientation biomimétique, où la forme architecturale est pensée comme un

système évolutif capable d'adaptation. Ces pratiques renouent avec une pensée processuelle de l'architecture, dans laquelle la forme n'est jamais donnée d'avance, mais émerge d'une logique transformationnelle fondée sur des données précises (climat, lumière, flux, gravité).

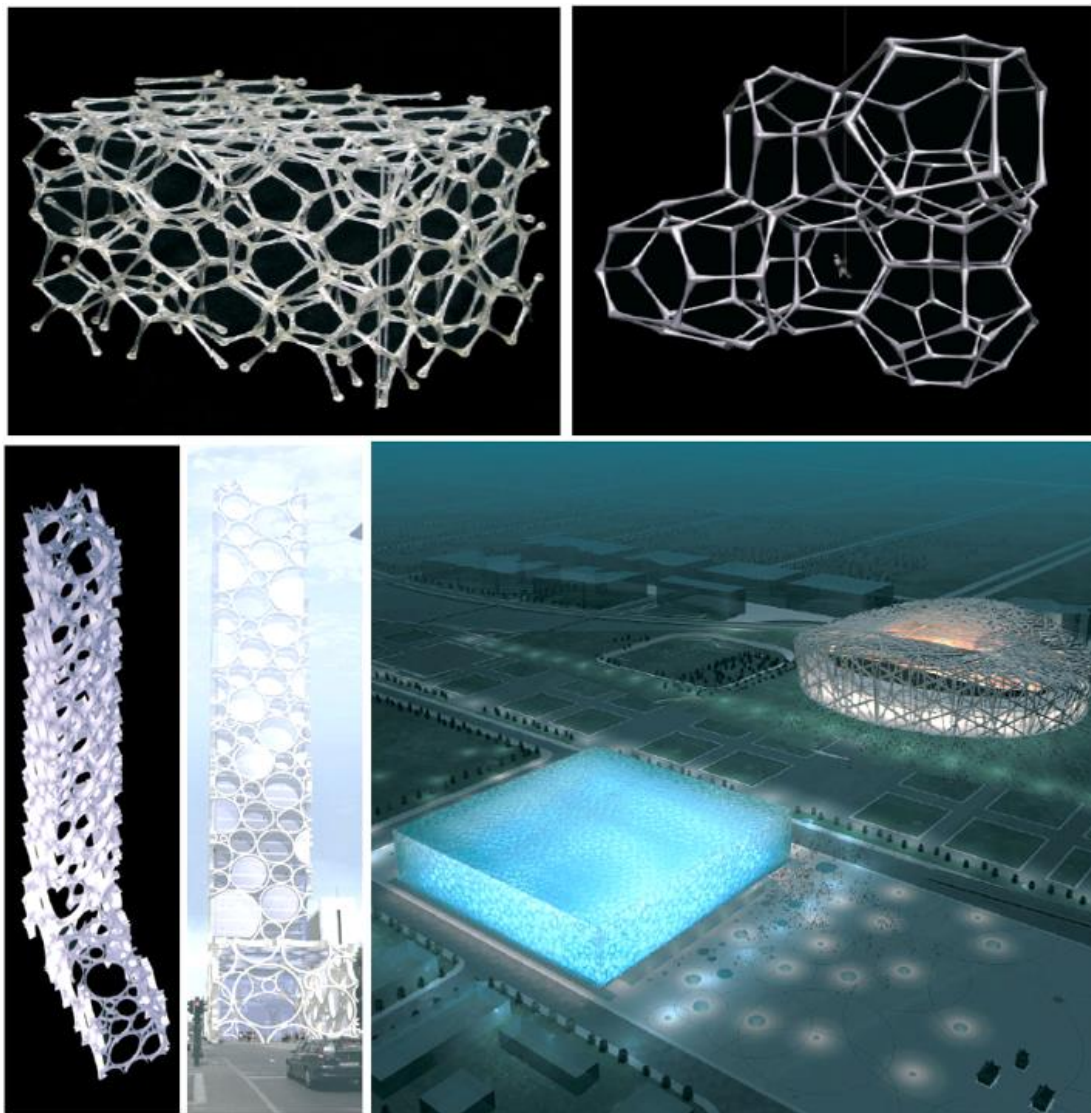


Figure 2.18. Structures et projets architecturaux inspirés d'une goutte d'eau. Source : Hensel et Menges (2006).

De son côté, Roudavski (2009) définit la morphogenèse en architecture comme un ensemble de méthodes numériques qui permettent de générer la forme de manière procédurale, en s'appuyant sur des processus automatisés, itératifs et souvent contextuels, plutôt que sur une simple représentation visuelle. Plus précisément, il insiste sur le fait que la morphogenèse en architecture consiste à utiliser les outils numériques non pas comme support de visualisation, mais comme outils génératifs pour la création et la transformation de la forme architecturale. Cette approche se distingue par sa capacité à exprimer des processus dynamiques dans la forme bâtie, tels que la croissance, la différenciation ou l'adaptation, des notions directement inspirées du vivant. Cependant, Roudavski souligne que cette morphogenèse en architecture est le plus souvent analogique ou métaphorique : elle imite l'aspect des processus naturels (par exemple, les formes de bulles ou de cellules), sans en adopter les logiques profondes, comme l'auto-organisation, l'adaptabilité ou la hiérarchie dynamique qui caractérisent la morphogenèse biologique. Ainsi, dans sa perspective, la

véritable morphogenèse architecturale devrait non seulement générer des formes complexes, mais aussi intégrer :

- Une logique de croissance continue.
- Une réactivité aux contraintes locales,
- Une hiérarchie multi-niveau (du détail à l'ensemble)
- Une capacité d'adaptation automatique dans le temps.

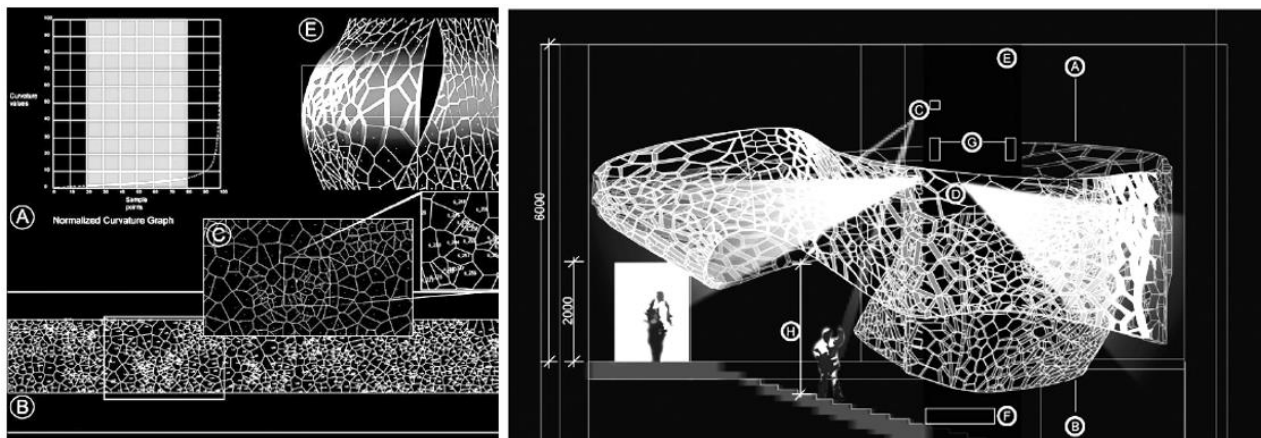


Figure 2.19. Génération de formes architecturales à base de simulation analogiques aux formes naturelles.
Source : Roudavski (2009)

En effet, c'est à partir des années 1990, avec l'essor des théories de la complexité et des outils computationnels, que la morphogenèse architecturale s'impose comme une méthodologie de génération formelle à part entière. Des architectes comme Achim Menges, Michael Hensel et Michael Weinstock développent une approche, où les processus biologiques sont simulés à l'aide d'algorithmes évolutionnaires, de systèmes L (Lindenmayer, 1968) ou de règles de croissance inspirées du comportement cellulaire (Hensel, Menges & Weinstock, 2012). La forme n'est alors plus prédéfinie, mais émerge d'un processus computationnel itératif, intégrant des données environnementales, structurelles et matérielles. Cette orientation rejoint une conception émergente de la conception architecturale, en cohérence avec les théories de la complexité (Kotnik, 2010). La morphogenèse architecturale dépasse ainsi l'imitation formelle pour devenir une véritable stratégie générative : les structures sont conçues comme des systèmes adaptatifs, capables d'auto-organisation, de réactivité aux contraintes locales, et de performance intégrée. L'architecture biomimétique articule ainsi forme, fonction et environnement dans une logique morphogénétique, qui dépasse les approches traditionnelles de composition. De cette évolution se dégagent deux grandes approches contemporaines. La première, appelée « architecture évolutionnaire » ou « architecture morphogénétique », conçoit la forme comme le produit d'un processus itératif et autoorganisé, souvent modélisé à l'aide d'outils computationnels et inspiré des logiques du vivant. La seconde est le « biomimétisme », dont les racines remontent à l'Antiquité et à la Renaissance, mais qui connaît aujourd'hui un renouveau. Fondée sur l'observation et l'imitation des formes, structures et processus biologiques, elle vise à générer des solutions architecturales à la fois performantes, efficaces et innovantes.

Le biomimétisme désigne l'approche de conception fondée sur l'étude des formes, structures et processus du vivant, en vue de leur transposition dans la production architecturale. Il ne s'agit pas de reproduire fidèlement les apparences de la nature, mais d'en comprendre les logiques de génération : croissance, différenciation, efficacité structurelle, adaptabilité, ou encore optimisation énergétique. De ce fait, la forme architecturale est perçue comme le résultat d'un processus évolutif, où matière, fonction et environnement interagissent dynamiquement (Pawlyn, 2011). Le biomimétisme s'inscrit ainsi dans une approche processuelle, systémique et performative, étroitement liée à la morphogenèse biologique. Historiquement, cette sensibilité à la nature et à ses principes structurels n'est pas nouvelle. Déjà à la Renaissance, Léonard de Vinci analysait les structures osseuses, les coquilles ou les plantes, y recherchant les principes d'organisation cachés dans les formes naturelles. Ses carnets révèlent une volonté de comprendre les lois physiques et mécaniques qui sous-tendent la morphologie du vivant, préfigurant une conception rationnelle et dynamique de la forme (Brioist, 2019).

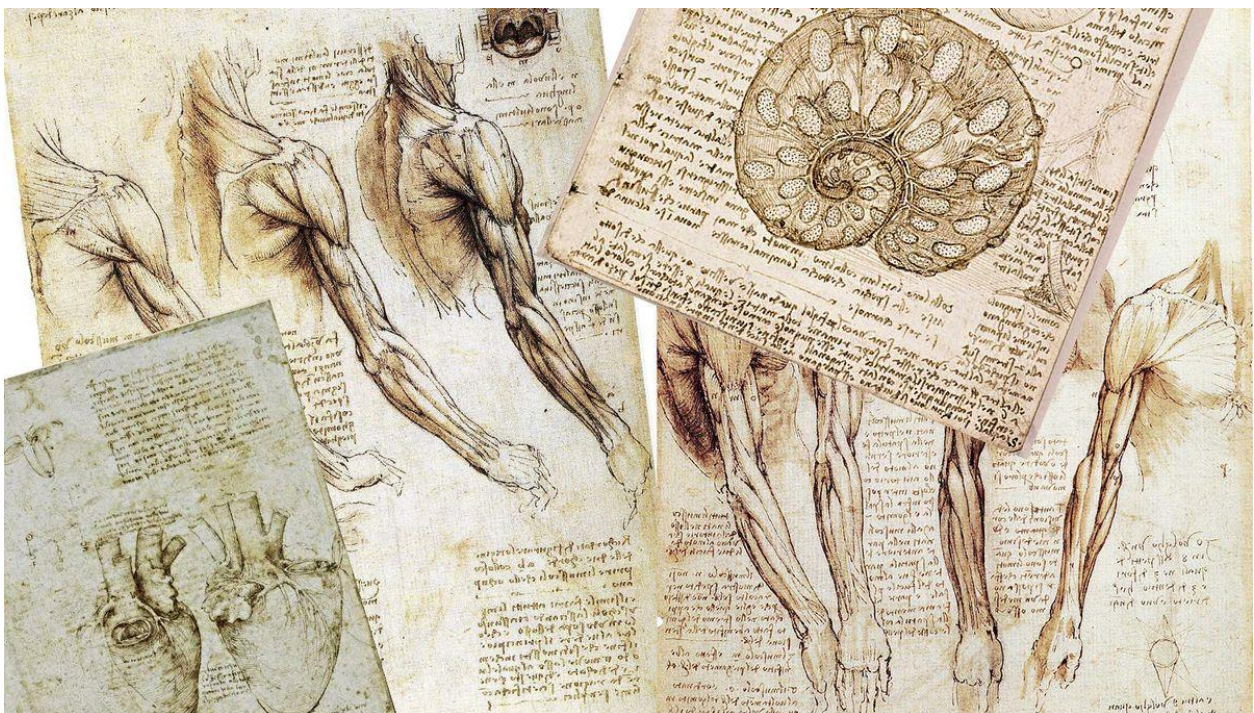


Figure 2.20. Planches d'anatomie réalisées par Léonard de Vinci. Source : <https://www.radiofrance.fr/franceculture/3-dessins-de-leonard-de-vinci-anatomiste-de-genie-3328882>, consulté en Novembre 2004.

Au début du XXe siècle, la pensée de Thompson (1917), marque une étape décisive. Il montre que les formes biologiques obéissent à des lois physiques et mathématiques, et qu'elles résultent d'un équilibre entre forces internes et contraintes externes. Cette vision transformationnelle et structurale a influencé durablement la manière dont la morphogenèse peut être transposée à d'autres champs, notamment l'architecture et le génie civil (voir figure 2.21). Dans la sphère constructive, Otto (2009) constitue une autre figure clé. Ses travaux sur les structures légères et les systèmes basés de membranes, filets... incarnent une pratique où la forme émerge de la matière elle-même, selon les lois physiques minimales. Ses expérimentations comme les maquettes suspendues ou les surfaces minimales, traduisent un biomimétisme physique et structurel, orienté vers l'optimisation, l'économie de matière et la performance environnementale (voir figures 2.22 et 2.23).

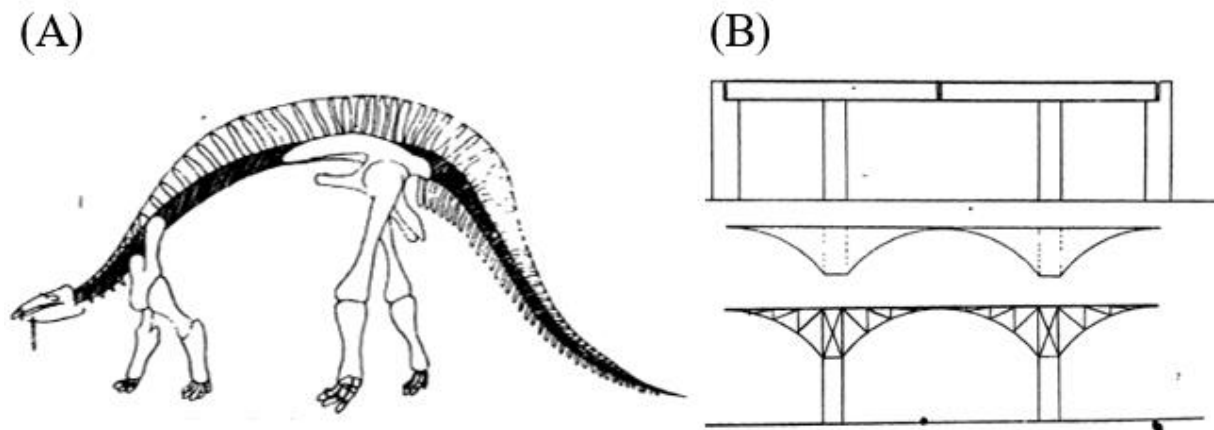


Figure 2.21. La biologie animale influençant le système constructif : (A) Squelette d'un dinosaure ; (B) Différentes configurations de poutres reprenant logique structurelle du dinosaure. Source : Thompson (1917)

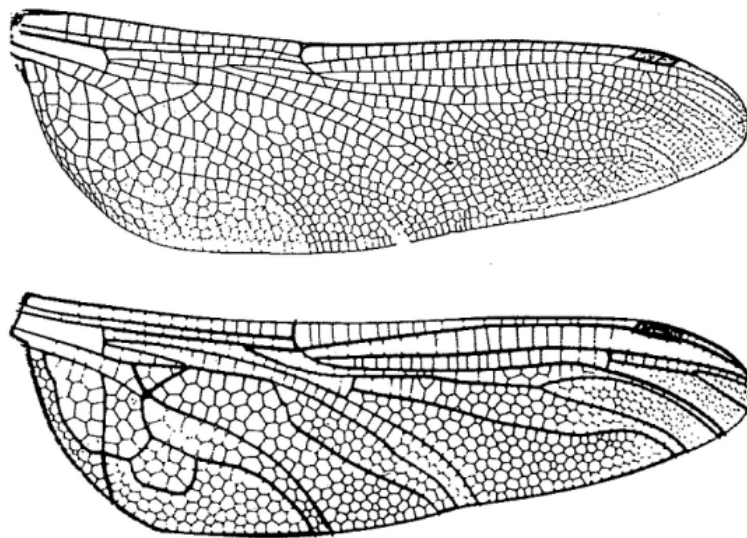


Figure 2.22. Ailes de mouche reprises comme structures en membranes. Source : Otto (2009)

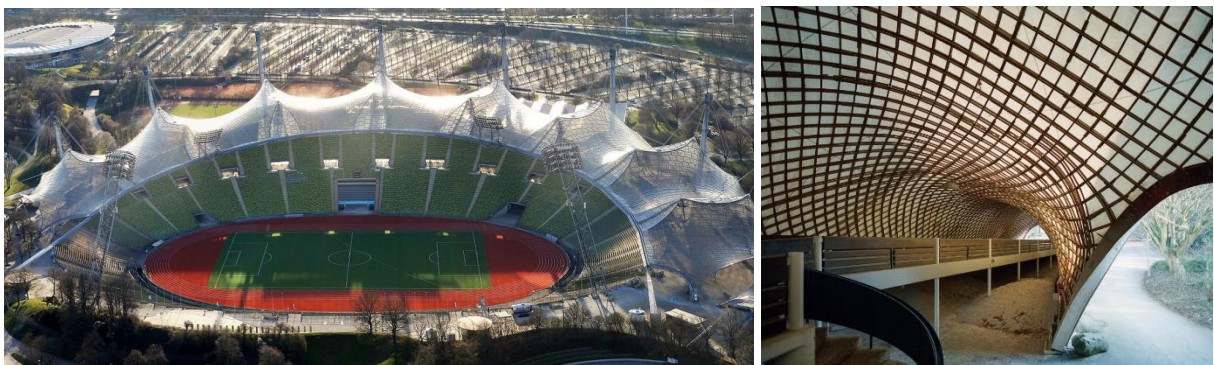


Figure 2.23. Différentes structures légères conçues par Frei Otto reprenant l'approche biomimétiste. Source : https://parametric-architecture.com/inventing-experimenting-and-collaborating-the-architectural-biography-of-frei-otto/?srsltid=AfmBOorKtTGI0fbA3R2I0ci8lZUaZ9zCSKbOmwzHaK_9HJ72x3j6b-SV, consulté en Novembre 2024.

Parallèlement, comme le confirme Benyus (2002), des architectes comme Antoni Gaudí ont intuitivement mobilisé des principes biomimétiques, en s'appuyant sur des modèles physiques pour explorer les effets de gravité, de charge ou d'équilibre. Dans la « *Sagrada Família* », il utilise des chaînes suspendues pour simuler les courbes funiculaires inversées, traduisant une quête d'efficacité structurelle et de forme générée par la contrainte. Dans l'Art nouveau, l'inspiration du vivant se manifeste principalement sous forme de motifs ornementaux ou de courbes végétales, comme chez Victor Horta ou Hector Guimard. L'Art déco, bien que plus géométrique, conserve encore des références naturalistes, souvent stylisées. Toutefois, ces courants restent davantage dans le registre esthétique ou symbolique, sans véritable modélisation des processus morphogénétiques.



Figure 2.24. Vue sur la Sagrada Família. Source : <https://www.archdaily.com/438992/ad-classics-la-sagrada-familia-antoni-gaudi>, consulté en Novembre 2024.

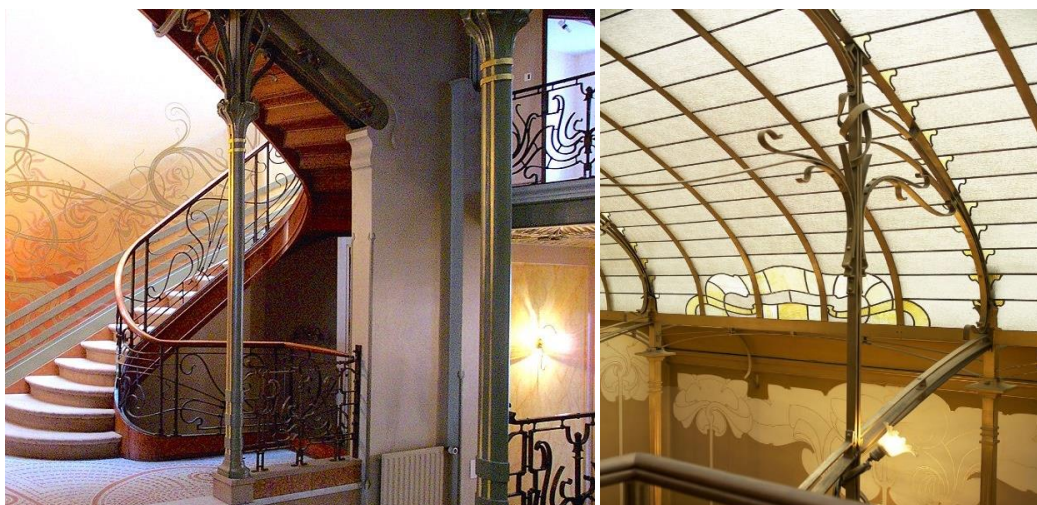


Figure 2.25. Détails architecturaux reprenant les figures naturelles dans l'œuvre de Victor Horta. Source : <https://www.archdaily.com/896933/the-work-of-victor-horta-art-nouveaus-esteemed-architect>, consulté en Novembre 2024.

. Conclusion

Ce chapitre a constitué une étape dans la construction du cadre conceptuel et théorique relatif pour comprendre la morphogenèse et par extension la morphogenèse urbaine. Définies comme la manière dont les formes apparaissent, évoluent et s'organisent dans le temps. En croisant plusieurs champs disciplinaires, notamment la biologie, la physique, l'architecture et l'urbanisme, nous avons mis en évidence que la forme n'est pas un objet figé ou purement visuel. Elle résulte plutôt de processus dynamiques, portés par des interactions multiples entre les éléments internes d'un système et les influences de son environnement. Nous avons ainsi montré que la compréhension des formes passe par l'étude des transformations, des contraintes et des régulations qui affectent un système en évolution. L'approche morphogénétique propose de penser la forme non comme un but à atteindre, mais comme un état transitoire dans un processus continu de formation. Dans cette perspective, la forme est inséparable du processus qui la génère.

L'apport des théories de la complexité est déterminant dans cette réflexion. Elle permet de dépasser la vision linéaire et déterministe de la genèse des formes. Ces concepts nous permettent de mieux saisir comment des structures organisées peuvent apparaître spontanément à partir de dynamiques locales, souvent simples, mais interconnectées. L'analyse des travaux fondateurs de D'Arcy Thompson, Alan Turing, René Thom et Christopher Alexander nous a permis de retracer l'évolution des théories de la forme depuis les sciences du vivant jusqu'à la conception architecturale et urbaine. Chacun, à sa manière, a apporté une contribution majeure à la compréhension des processus morphogénétiques : du rôle des forces physiques à la logique mathématique des motifs, des transitions de forme aux structures de conception adaptées à un contexte.

En intégrant ces approches, nous avons vu comment les principes de la morphogenèse peuvent enrichir la pensée architecturale et urbaine. La ville et l'architecture ne sont plus conçues comme des formes statiques ou imposées de l'extérieur, mais comme des systèmes évolutifs, capables de répondre à des contraintes multiples et de s'adapter à leur environnement. Cette vision ouvre la voie à une conception plus souple, plus contextuelle et plus durable de l'espace construit. Ce socle théorique constituera le point de départ des analyses menées dans les chapitres suivants. Nous nous pencherons plus particulièrement sur la morphogenèse des villes traditionnelles, en explorant comment leurs formes se sont construites au fil du temps selon des logiques complexes. L'objectif sera de comprendre ces dynamiques à travers les outils et les concepts issus des théories de la complexité, afin de proposer des méthodes de modélisation adaptées à ces réalités historiques et culturelles, notamment dans le contexte des villes islamiques traditionnelles d'Algérie.

. Notes et références bibliographiques

Bourdin, S., Paoli, M., et Reltgen-Tallon, A. (2015). *La forme de la ville de l'Antiquité à la Renaissance* [Édition numérique]. Presses universitaires de Rennes.

West, G. (2017). *Scale: The universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies* [Ebook edition]. Penguin Press.

Dauphiné, A. (2003). *Les théories de la complexité chez les géographes*. Paris : Anthropos (Économica).

Roudavski, S. (2009). Towards morphogenesis in architecture. *International Journal of Architectural Computing*, 7(3), 345–374. <https://doi.org/10.1260/147807709789621266>.

- Plazanet, C., et Berger, P. (2008). *Morphogenèse de la métropole : Rapport final* [Projet de recherche interdisciplinaire EPFL / VPAA / Fonds 590612]. Lausanne, Suisse : EPFL, laboratoire UTA.
- Rey, A. (Éd.). (2009). *Le Petit Robert de la langue française 2009* (édition revue et corrigée). Paris : Dictionnaires Le Robert.
- Jeuge-Maynard, I. (Éd.). (2010). *Le Petit Larousse illustré 2010*. Paris : Larousse.
- Tort, P. (1996). *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*. Paris : Presses Universitaires de France -PUF.
- Dubois, J., Mitterand, H., & Dauzat, A. (2005). *Grand dictionnaire étymologique et historique du français*. Paris : Larousse.
- Davies, J. A. (2005). *Mechanisms of morphogenesis* [eBook edition]. Elsevier Academic Press.
- Tirico, M. (2020). *Morphogenesis of complex networks: An application in urban growth* [Thèse de doctorat, Université Le Havre Normandie]. Le Havre: Université Le Havre Normandie.
- Lesne, A., & Bourguine, P. (2006). Introduction. In P. Bourguine & A. Lesne (Eds.), *Morphogenèse : L'origine des formes* (pp. 13–26). Paris : Éditions Belin.
- Cambien, A. (2007). *Une introduction à l'approche systémique : Appréhender la complexité* (Rapport de recherche). Lyon: Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU).
- Silva, V. (2010). *Conception et évaluation d'un prototype de simulation de la morphogenèse urbaine par agents vecteurs multi-échelles* [Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Laboratoire de systèmes d'information géographique, Programme doctoral en environnement]. École polytechnique fédérale de Lausanne.
- Fortier, J.-F. (2023). *Géomorphogenèse : définition et explications*. AquaPortail. <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/13415/geomorphogenese>.
- Pernreiter, S., Gonzalez-Alvarez, I., Klump, J., Smith, G., & Ibrahimi, T. (2018). *Landscape evolution in the south Yilgarn Craton and Albany-Fraser Orogen, Western Australia* (CSIRO: EP183453). CSIRO. <https://doi.org/10.4225/08/5b22bb3b9f4af>.
- Aubin, J.-P., & Lesne, A. (2006). Analyse morphologique et mutationnelle : des outils pour la morphogenèse. In P. Bourguine & A. Lesne (Eds.), *Morphogenèse : L'origine des formes* (pp. 309–326). Paris : Éditions Belin.
- Pousse, R. (2020). *Caractérisation et modélisation du réseau viaire* [Thèse de doctorat, Université de Paris]. Laboratoire Matière et Systèmes Complexes.
- Pretorius, D. (2020). *A Morphogenetic Approach to Social Development* [Rapport de recherche]. Göteborg : Mistra Urban Futures.
- Maccarini, A. M. (2011). Towards a new European sociology: The morphogenetic approach between social analysis and grand theory. In A. M. Maccarini, E. Morandi, & R. Prandini (Eds.), *Sociological realism* (1st ed., pp. 27–52). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203803356>.
- Archer, M. S. (2013). Social morphogenesis and the prospects of morphogenic society. In M. S. Archer (Ed.), *Social morphogenesis* (pp. 1–22). New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6128-5>.
- Gonod, M. (2014). *Le vivant, l'organisme et la morphologie : Repenser la forme au début du XIX^e siècle. L'exemple de Goethe* [Article en ligne]. Épistémocritique, (13). <https://epistemocritique.org/le-vivant-lorganisme-et-la-morphologie-repenser-la-forme-au-debut-du-xixe-siecle-lexemple-de-goethe/>.

- Schmitt, S. (2001). Type et métamorphose dans la morphologie de Goethe, entre classicisme et romantisme / Type and metamorphosis in Goethe's morphology: Between classicism and romanticism. *Revue d'histoire des sciences*, 54(4), 495–521. <https://doi.org/10.3406/rhs.2001.2135>.
- Park, J.-J. (2010). *Morphogenèse de la ville contemporaine : Essai sur la multi-échelle* [Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Laboratoire de projet urbain, territorial et architectural, Programme doctoral en environnement]. École polytechnique fédérale de Lausanne.
- Thompson, D. W. (1917). *On growth and form*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Scheffer, O. (2017). *Villes émergentes, villes mutantes : La théorie des systèmes complexes et de l'évolution appliquée à la modélisation urbaine* [eBook edition]. London: Éditions universitaires européennes.
- Franceschelli, S. (2012). Morphogenèse et paysages dynamiques. In S. Franceschelli et al., *Morphogenèse et dynamiques urbaines*. Cycle de séminaires organisé par le PUCA (pp. 218–230). Lyon, France: PUCA.
- Cazzaro, I. (2020). L'émergence d'une forme : Le modèle d'Alan Turing et la conception de l'image entre *Naturalia et Artificialia*. In *L'Imagination. Actes du 37e Congrès de l'ASPLF*. London : College Publications.
- Turing, A. M. (1952). The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 237(641), 37–72. <https://doi.org/10.1098/rstb.1952.0012>
- Le Guyader, H. (2008). Morphogenèse, structures physiques et évolution biologique. *Comptes Rendus Chimie*, 11(3), 186–191. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2007.11.001>.
- Petitot, J. (2006). Les modèles morphogénétiques de René Thom. In P. Bourguin & A. Lesne (Eds.), *Morphogenèse : L'origine des formes* (pp. 288–297). Paris: Éditions Belin.
- Marcos, I., & Morier, C. (2023). Centenaire de René Thom (1923–2023) : hommage sémiotique et morpho dynamique. *Estudos Semióticos*, 19(1), i–xxviii. <https://doi.org/10.11606/issn.1980-4016.esse.2023.210388>
- Waddington, C. H. (1989). Avant-propos. In R. Thom, *Structural stability and morphogenesis: An outline of a general theory of models* (pp. xxvi–xxvii) [eBook edition]. Taylor & Francis Group.
- Alexander, C. (1964). *Notes on the synthesis of form*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Mehaffy, M. (2007). Notes on the genesis of wholes: Christopher Alexander and his continuing influence. *Urban Design International*, 12(1), 41–49. <https://doi.org/10.1057/palgrave.udi.9000182>.
- Jiang, B. (2019). Christopher Alexander and his life's work: The *Nature of Order*. *Urban Science*, 3(1), 30. <https://doi.org/10.3390/urbansci3010030>.
- Gauthier, B. (2003). *Espace urbain, vocabulaire et morphologie*. Paris : Éditions du Patrimoine.
- Allain, R. (2004). *Morphologie urbaine : Géographie, aménagement et architecture de la ville*. Paris : Armand Colin.
- Raynaud, D. (1999). Forme urbaine : Une notion exemplaire du point de vue de l'épistémologie des sciences sociales. In P. Boudon (Éd.), *Langages singuliers et partagés de l'urbain* (Actes du colloque LOUEST, CNRS UMR 7544, pp. 93–120). Paris : L'Harmattan.
- Lévy, A. (2005). Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine. *Espaces et Sociétés*, 122(3), 25–48.
- Merlin, P., et Choay, F. (Éds.). (1996). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement* (2^e éd.). Paris : Presses Universitaires de France - PUF.

- Moudon, A. V. (1997). Urban morphology as an emerging interdisciplinary field. *Urban Morphology*, 1(1), 3–10.
- Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude : Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste* [Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d'Azur, Nice].
- Tirico, M. (2020). *Morphogenesis of complex networks: An application in urban growth* [Thèse de doctorat, Université Le Havre Normandie]. Le Havre: Université Le Havre Normandie.
- Roncayolo, M. (2002). *Lectures de villes : Formes et temps*. Marseille : Parenthèses.
- Vance, J. E. Jr. (1977). *This Scene of Man: The Role and Structure of the City in the Geography of Western Civilization*. New York, NY: Harper & Row.
- Sharpe, C. A. (1986). The teaching of urban morphogenesis. *Canadian Geographer*, 30(1), 53–59. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.1986.tb01025.x>.
- Alexander, C., Ishikawa, S., & Silverstein, M. (1977). *A pattern language: Towns, buildings, construction*. New York: Oxford University Press.
- Alexander, C. (1979). *The timeless way of building*. New York: Oxford University Press.
- Alexander, C. (2001). *The nature of order, Book One: The phenomenon of life*. Berkeley, CA: The Center for Environmental Structure.
- Porta, S., Rofè, Y. R., & Vidoli, M. P. (2015). *The city and the grid: Building beauty at large scale*. In M. Mehaffy (Ed.), *A city is not a tree: 50th anniversary edition* (pp. 163–181). Portland, OR: Sustasis Press.
- Mehaffy, M. W. (2015). *Notes on the genesis of wholes: "A city is not a tree" in the larger context of Alexander's career*. In M. W. Mehaffy (Ed.), *A city is not a tree: 50th anniversary edition* (pp. 123–144). Portland, OR: Sustasis Press.
- Caliskan, O. (2013). *Pattern formation in urbanism: A critical reflection on urban morphology, planning and design* [Thèse de doctorat, Université de technologie de Delft]. *A+BE | Architecture and the Built Environment*
- Lévy, A. (2012). La forme urbaine comme forme complexe : Une introduction à la morphologie urbaine. In Franceschelli et al., (ED.) *Cycle de séminaires organisé par le PUCA* (pp. 20–30). Lyon, France : PUCA.
- Douady, C.-N. (2016). *La ville comme processus : Derrière la forme urbaine, quelle dynamique ? Essai*. Paris : L'Harmattan.
- Marcos, I. (2012). Urban morphogenesis. *Semiotica*, 2012(192), 1–14. <https://doi.org/10.1515/sem-2012-0077>.
- Batty, M. (2005). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Salingaros, N. A., Coward, L. A., West, B. J., & van Bilsen, A. (2005). *Principles of urban structure*. Amsterdam: Techné Press.
- Portugali, J. (2000). *Self-Organization and the City* [eBook edition]. Berlin: Springer-Verlag.
- Hillier, B. (1996). *Space is the machine: A configurational theory of architecture*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wohl, S. (2020). *Complex adaptive systems & urban morphogenesis: Analyzing and designing urban fabric informed by CAS dynamics* [Thèse de doctorat, Université de Technologie de Delft]. TU Delft Open.

- Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3), 229–265. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>.
- Kwinter, S. (2001). *Architectures of time: Toward a theory of the event in modernist culture* (eBook ed.). MIT Press.
- Hensel, M., et Menges, A. (2006). Techniques and technologies in morphogenetic design [Ebook edition]. Wiley-Academy.
- Weinstock, M. (2010). *The architecture of emergence: The evolution of form in nature and civilisation* (eBook ed.). Wiley.
- Pawlyn, M. (2016). *Biomimicry in architecture* (2nd ed.) [Ebook edition]. RIBA Publishing.
- Brioist, P. (2019, juin). Léonard de Vinci et la méthode biomimétique. Dans P. Brioist & L. Fagnard (Éds.), *62e colloque international d'études humanistes – Léonard de Vinci : invention et innovation, Tours, France*.
- Otto, F. (2009). *Occupying and connecting: Thoughts on territories and spheres of influence with particular reference to human settlement*. Stuttgart : Edition Axel Menges.
- Benyus, J. M. (2002). *Biomimicry: Innovation inspired by nature* [eBook]. Mariner Books.
- Kotnik, T. (2010). Digital architectural design as exploration of computable functions. *International Journal of Architectural Computing*, 8(1), 1–16. <https://doi.org/10.1260/1478-0771.8.1.1>.

Chapitre 3 : Théories de la complexité et science des systèmes complexes, fondements et applications à la ville

« Je pense que le 21ème siècle sera le siècle de la complexité... »
Stephen Hawking

« L'unité d'un plan se cache sous le masque de la diversité de structure, le complexe évolue partout à partir du simple. »
Thomas H. Huxley

. Introduction

Depuis la seconde moitié du XXe siècle, un changement de paradigme s'est opéré dans la manière de penser les phénomènes naturels, sociaux et techniques. La rationalité linéaire, réductionniste et déterministe, héritée de la science classique, a progressivement laissé place à une vision plus globale, dynamique et systémique des processus complexes. C'est dans ce contexte que sont apparues les théories de la complexité, portées par la convergence de disciplines aussi diverses que la physique, la biologie, l'informatique, les sciences sociales ou encore la géographie. Ces approches ne visent pas à simplifier le réel, mais à en saisir la richesse, l'imprévisibilité et les mécanismes qui en déterminent l'évolution.

Les études urbaines ont été aussi profondément influencées par ce tournant épistémologique. Cette évolution a conduit à repenser la ville non plus comme un objet statique et planifié, mais comme un système vivant, en constante évolution. La ville se caractérise par une croissance irrégulière et imprévisible, une grande diversité de formes et des interactions multiples entre les habitants, les usages, les réseaux et les structures bâties. Elle fonctionne plus comme un système complexe, où les transformations ne sont pas toujours prévisibles, mais résultent de multiples processus locaux qui interagissent entre eux. Dès lors, des questions fondamentales s'imposent tel que : comment penser les formes urbaines non comme le produit d'un plan déterminé, mais comme le résultat de dynamiques émergentes, imbriquées dans un tissu d'interactions multi-échelles ? Dans ce cadre, comprendre la morphogenèse urbaine, c'est-à-dire la manière dont les formes urbaines se créent, évoluent et se transforment, nécessite de mobiliser les outils théoriques et conceptuels développés par les théories de la complexité, qui permettent d'analyser ces dynamiques.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les bases conceptuelles, théoriques et historiques des théories de la complexité, avant d'en explorer les applications dans les études urbaines. Il commence par une première section qui clarifie les notions essentielles de complexité, ainsi que les principaux courants de pensée. La section suivante aborde les principes fondamentaux de cette approche, comme l'auto-organisation, et l'émergence. Un passage historique permet ensuite de replacer ces idées dans le contexte plus large de l'évolution de la pensée complexe. Sur cette base, le chapitre examine ensuite comment la ville peut être comprise comme un système complexe, à travers des apports issus des études urbaines, de la géographie et de la science des systèmes. Enfin, la dernière section introduit les principes de modélisation de la morphogenèse urbaine, en montrant comment les outils issus de la complexité permettent d'analyser les processus de formation, de transformation et d'organisation des formes urbaines.

1. Complexité, théories de complexité, et science des systèmes complexes

Morin (2005, p 10) affirmait : « ... La complexité n'est pas un simple terme à définir. La complexité est un mot problème et non un mot solution... », Cette affirmation rappelle que la complexité ne renvoie pas à une simple notion, mais à un ensemble de problématiques

scientifiques visant à comprendre des systèmes caractérisés par la diversité, l'instabilité et l'interaction. Les théories de la complexité se sont développées à partir de la seconde moitié du XXe siècle, à la croisée de plusieurs disciplines (physique, biologie, informatique, sciences sociales), pour analyser des phénomènes où les comportements globaux émergent d'interactions locales entre un grand nombre d'éléments. Elles ont donné naissance à une science des systèmes complexes, qui propose de nouveaux outils théoriques et méthodologiques pour étudier ces dynamiques. Ce point s'attache à définir la complexité d'un point de vue linguistique, étymologique et selon les différentes approches scientifiques.

1.1. Définition linguistique et étymologique

Le nouveau Petit Robert définit complexité comme nom féminin apparu en 755, issu du terme complexe. Complexité signifie état, caractère de ce qui est complexe, ainsi que difficulté liée à la multiplicité des éléments et à leur relation. Le terme complexe quant à lui, est apparu au XIVe siècle. Il est défini comme adjectif et nom masculin issu du latin « *complexus* » et « *complecti* » signifiant contenir, et réunir plusieurs éléments différents (Rey, 2009, p.486). Conjointement, Le Petit Larousse illustré mentionne la multiplication des utilisations du terme complexe dans différents domaines. En chimie, le terme complexe exprime le composé formé d'un ou de plusieurs atomes ou d'un ion central. En psychanalyse, le terme désigne l'ensemble de sentiments et de représentations partiellement ou totalement inconscients, pourvus d'une puissance affective qui organise la personnalité de chacun et le mode de relation à autrui, comme dans le complexe d'Œdipe. Le terme complexe peut également désigner l'ensemble d'industries concourant à une production particulière, comme dans le cas d'un complexe sidérurgique. Il peut également désigner l'ensemble d'installations groupées en fonction de leur utilisation, exemple des complexes touristiques (Jeuge-Maynard, 2010, p. 229).

Par ailleurs, Dauphiné (2003, p. 4-5) confirme que dans le langage courant, le complexe se définit par opposition au simple. La complexité a donc plusieurs dimensions et elle est difficile à définir. En effet, les épistémologues soulignent que le terme complexité est très polysémique et que certains lui attribuent plus d'une trentaine de définitions de sens différentes. Miller (2015, p. 17-20) souligne également que, dans le passé, le terme complexe était utilisé pour décrire les phénomènes qui dépassaient notre compréhension et, par conséquent, notre capacité d'influence. Cependant, la complexité est un aspect de la nature qui se prête à l'étude scientifique, à la compréhension et peut-être même au contrôle. Une fois cet aspect reconnu, une vaste frontière de découvertes s'ouvre à nous. Aussi, Morin (2005, p. 46-47) mentionne que l'idée de complexité était beaucoup plus répandue dans le vocabulaire courant que dans le vocabulaire scientifique. En fait, la complexité avait son terrain élu, mais sans le mot lui-même, dans la philosophie : dans un sens, la dialectique hégélienne était son domaine. En science, la complexité est apparue bien plus tard au XXe siècle, dans la micro physique et la macro physique.

Parallèlement, Holland (2014, p. 26) insiste sur la nécessité de distinguer entre complexe et compliqué. Les dictionnaires n'aident pas à faire cette distinction, traitant les deux termes comme des quasis synonymes et mettant l'accent sur les parties interconnectées dans les deux cas. Il ajoute que pour ces raisons, la complexité, comme la vie et la conscience, n'a pas de définition rigoureuse. Toutefois, cette absence de définition rigoureuse n'empêche pas une approche minutieuse du sujet. La complexité se distingue aussi du compliqué. Pour

Morin (1981), le terme compliqué est quelque chose qui peut être décomposé en éléments simples. La complication, quant à elle, introduit une idée de succession ou d'addition. Dauphiné (2003, p. 42-43) affirme que la complexité était parfois assimilée au terme combinaison, désignant un assemblage de plusieurs choses deux par deux, trois par trois, ou en général, nombre par nombre dans un ordre déterminé. Par ailleurs, la complexité renvoie plus à l'entrelacement et met en valeur non seulement un groupement de plusieurs éléments ou idées, mais aussi la difficulté de séparer les composants, qui sont tissés ensemble.

1.2. Définitions scientifiques et paradigme de la complexité

Holland (2014, p. 24) confirme si par le passé la complexité était un terme courant pour décrire des objets aux nombreuses parties interconnectées, elle désigne aujourd'hui un domaine scientifique aux multiples branches. Dans le même esprit, Sengupta (2017) souligne que la théorie de la complexité « *Complexity theory* » est également appelée science de la complexité « *Complexity science* » ou simplement complexité « *Complexity* ». Par ailleurs, comme l'illustre la figure, Dauphiné (2003, p. 28) définit une théorie comme un ensemble de lois reliées entre elles par des principes internes, qui sont en réalité des lois plus générales unissant deux lois. Une théorie se distingue d'une hypothèse ou d'une loi en ce qu'elle est un ensemble de lois indépendantes, construit sur des axiomes ou des postulats. Un postulat se différencie d'un axiome par le fait que son évidence est posée a priori et qu'il n'est qu'une hypothèse commode, tandis qu'un axiome est une évidence non vérifiée. Le cœur d'une théorie, cet ensemble de lois interconnectées, est souvent représenté par divers modèles (mathématiques, informatiques, ...). Bien que les théories soient des constructions abstraites, toute abstraction n'est pas nécessairement d'ordre théorique. Après avoir élaboré une théorie, le chercheur en déduit les hypothèses qu'il doit vérifier. Toute théorie remplit quatre fonctions essentielles : prédictive (prévoir des phénomènes), explicative (éclairer les causes et les mécanismes), heuristique (stimuler de nouvelles recherches) et normative (influencer les actions et les décisions).

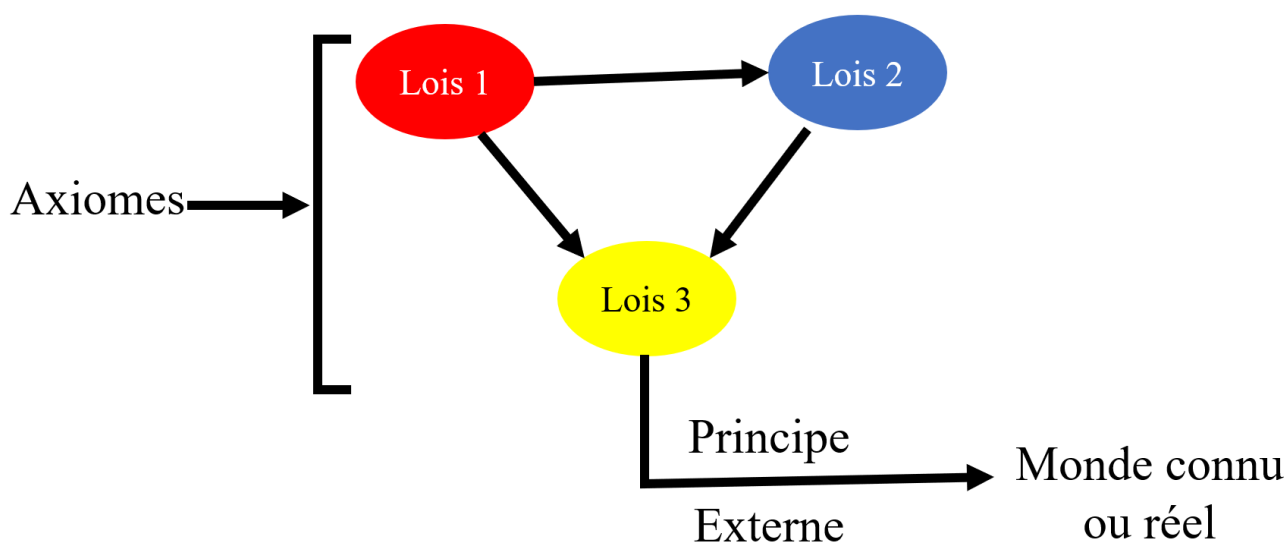


Figure 3.1. Schéma conceptuel d'une théorie. Source : Dauphiné (2013).

De leur côté, Balmaceda et Fuentes (2016) définissent la complexité comme un nouveau paradigme scientifique, ils affirment qu'il n'existe pas de définition précise, et donc unique, des systèmes complexes et de la science de la complexité, une branche relativement nouvelle de la science. La plupart des chercheurs travaillant dans ce domaine s'accordent sur certaines des propriétés essentielles qu'un système doit posséder pour être qualifié de complexe, principalement l'émergence et l'auto organisation. Selon Siegenfeld et Bar-Yam (2020) la science de la complexité ou science des systèmes complexes examine les systèmes composés d'une multitude de composants. Ces systèmes peuvent être de nature physique, biologique ou sociale. Compte tenu de cette diversité de systèmes, il peut sembler paradoxal de les étudier sous un cadre unique. De plus, Crawford (2016) mentionne que la théorie de la complexité explore la genèse et les propriétés des systèmes complexes, en analysant leurs caractéristiques et leur dynamique. Science relativement jeune, elle n'a pas encore établi de cadre unifié. Ces théories émergent de l'influence indépendante et convergente de multiples disciplines, qui ont progressivement étudié les systèmes (Sengupta, 2017).

En effet, les théories de la complexité visant à examiner la complexité et les systèmes complexes, sont considérées dans le discours scientifique comme un concept parapluie (Partanen et Wallin, 2018), en raison de leur nature transdisciplinaire, interdisciplinaire et multi-perspective. Leur développement s'étend sur plusieurs générations (Alhadeff-Jones, 2008). Stephan (2019) confirme que les théories de la complexité ont été adoptées tant en sciences naturelles qu'en sciences sociales, et ont gagné en popularité dans les études urbaines. Elles regroupent des principes et des concepts issus de l'ontologie, de la philosophie, de la physique, de l'informatique, de la biologie et de l'ingénierie, ainsi que de la géographie, de la sociologie, des sciences politiques, de la psychothérapie et de l'économie, entre autres. Ces théories se penchent sur des problèmes dynamiques, imprévisibles et multidimensionnels, caractérisés par un ensemble de relations et de parties interconnectées. Elles cherchent à comprendre et à gérer ces problèmes complexes, en étudiant les ensembles connectés plutôt que les éléments isolés. Tout au long de l'évolution des théories la complexité, deux tendances générales sont remarquées :

- **La première : interdisciplinaire**, pour certains scientifiques, la science de la complexité n'est que l'étude de branches de sciences différentes, chacune avec ses propres exemples de systèmes complexes (Ferreira, 2001).
- **La deuxième : transdisciplinaire**, d'autres chercheurs soutiennent qu'il existe un seul phénomène appelé complexité, qui se retrouve dans divers systèmes et qui peut faire l'objet d'une seule théorie ou approche scientifique (Mitchell, 2009).

D'autre part, Theise (2023, p. 18) affirme que la théorie de la complexité a émergé depuis la seconde moitié du XXe siècle, lorsque les scientifiques ont commencé à s'intéresser aux systèmes, terme désignant des groupes de parties ou d'individus en interaction qui, par leurs interactions, génèrent quelque chose de plus grand qu'eux-mêmes. C'est à partir des années 1980 que les études sur la complexité se sont finalement imposées comme un domaine établi et indépendant. Aussi, dans la même perspective, Miller (2015, p. 17-20) déclare qu'au cours des dernières décennies, la nouvelle science de la complexité a révélé comment des

éléments simples peuvent produire de la complexité, et des éléments complexes de la simplicité. Les principes fondamentaux de la complexité décrivent comment même les éléments les plus simples, une fois assemblés, semblent prendre vie d'eux-mêmes. Cette science adopte de nouveaux outils d'investigation, tels que les ordinateurs comme supports de modélisation, afin de dépasser les limites imposées par nos outils scientifiques traditionnels, tels que les divers éléments mathématiques, largement dérivés de la fin du XVII^e siècle, sur lesquels nous nous appuyons si souvent aujourd'hui. Plus fondamentalement, cette science remet en question notre conception traditionnelle selon laquelle la compréhension passe par la réduction des choses à leurs composantes les plus simples. Conjointement, Sayama (2015 p. 03-04) définit la science des systèmes complexes comme un domaine de recherche scientifique en plein essor qui comble l'énorme fossé entre les deux points de vue traditionnels qui considèrent les systèmes composés d'éléments totalement indépendants ou totalement couplés. La science des systèmes complexes développe des outils conceptuels, mathématiques et informatiques pour décrire les systèmes composés d'éléments interdépendants. Elle étudie les propriétés structurelles et dynamiques de divers systèmes afin d'en tirer des implications et des applications générales et transdisciplinaires.

De plus, Theise (2023 p. 18-19) affirme qu'avant ce passage à l'étude des systèmes, presque toutes les sciences pratiquaient une approche réductrice, décomposant les grands objets pour en isoler les composants. Le principe de longue date était que si l'on comprenait les parties, on pouvait alors comprendre le tout. Le succès de cette approche scientifique, qui considérait l'univers comme une machine à démonter pour l'analyser, apparaît clairement, de la manière la plus immédiate et la plus évidente, dans la panoplie de technologies qui envahit la vie moderne. Lorsque la théorie générale des systèmes a commencé à aborder formellement la question inverse - comment les parties se combinent-elles entre elles, s'assemblent-elles, s'auto-organisent-elles pour former un tout - ce fut le début d'une révolution scientifique qui se poursuit encore aujourd'hui, avec une profondeur toujours plus grande. L'application des concepts systémiques allait devenir pertinente pour comprendre les structures à toutes les échelles de l'existence, des plus petits domaines subatomiques aux systèmes galactiques et au-delà. Aussi, Dauphiné (2003, p. 41) résume ce changement de direction scientifique comme un changement du paradigme scientifique. Un passage du réductionnisme visant à réduire le réel en lois simples vers la complexité dépendante des interactions, des connexions, et des dynamiques des composants.

Ce changement de direction est perçu comme une évolution de la trajectoire scientifique, Basili (1998) explique que l'approche scientifique de l'étude de la complexité a subi une profonde transformation qui peut être interprétée comme un changement global de paradigme. L'attitude changeante à l'égard de la complexité trouve son origine dans l'idée que l'information intégrée dans les systèmes complexes est plus riche que celle provenant de composants uniques. Il n'est donc pas possible d'expliquer le complexe par le relativement simple sans tenir compte du fait que, lorsqu'elles sont organisées en un tout, les parties constitutives acquièrent des significations et des objectifs supplémentaires. Ce sont les fondements conceptuels qui soutiennent le changement épistémologique à l'origine du nouveau paradigme, connu sous le nom de paradigme de la complexité. Il s'agit d'un

paradigme fortement interdisciplinaire qui a été appliqué dans des domaines aussi divers que la physique, la biologie et la sociologie. En augmentant l'échelle de l'observation scientifique, il devient évident qu'entre des domaines apparemment hétérogènes, il existe d'importantes analogies et un trait commun : l'existence de systèmes constitués d'un grand nombre d'unités élémentaires en interaction. Dans la même perspective, Stephan (2019) dans les tableaux 3.1 et 3.2 compare l'approche réductionniste et l'approche de la complexité, premièrement sur le diagnostic des problèmes et deuxièmement sur la résolution des problèmes.

Tableau 3.1. Diagnostic des problèmes : approche analytique et systémique. Source : Stephan (2019).

Diagnostic des problèmes	
Approche linéaire réductrice	Approche systémique complexe
Décompose l'objet d'étude aux éléments constitutifs les plus simples: réductionnisme	Considère le système dans sa globalité, diversité et complexité: Holisme
Se concentre sur les parties isolées	Unifie et met l'accent sur les interrelations entre les parties
Étudie la nature de l'interaction : essaie de comprendre ce que font les parties	Étudie les effets de l'interaction: essaie de comprendre le comportement de l'ensemble
Est concerné par le contenu	Est concerné par le processus
Se base sur la connaissance des détails principalement mais les buts et les effets sont en second plan	Se base sur la connaissance des buts et effets en premier plan - les détails sont flous en première approche et s'éclaircissent avec l'évolution du processus
Considère que les villes peuvent être entièrement prévisibles et ordonnées	Considère que les villes sont imprévisibles dans un environnement chaotique
Causalité: pour résoudre un problème il faut d'abord savoir les causes	Finalité : pour résoudre un problème il faut d'abord clarifier l'objectif à atteindre
Analyse orientée passée-présent : Explication des dysfonctionnements	Analyse orientée présent-futur : adaptation et perception des dysfonctionnements comme opportunités

Tableau 3.2. Résolution des problèmes : approche analytique et systémique. Source : Stephan (2019).

Résolution des problèmes	
Approche analytique linéaire	Approche systémique complexe
Il existe un lien direct entre les symptômes du problème et leurs causes	La performance du système est en grande partie déterminée par les interdépendances des éléments du système, qui sont indirectes, circulaires et non évidentes
Essaie de réparer les symptômes	Est concerné par la dynamique sous-jacente
Est préoccupé par l'attribution du blâme	Essaie d'identifier les modèles du Fonctionnement
Essaie de contrôler le chaos pour créer l'ordre	Essaie de trouver des motifs dans le chaos
Modifie une variable à la fois : déroulement séquentiel	Modifie un groupe de variables : déroulements multiples simultanés
Conduit à l'action prévue en détail	Mène à l'action par le biais d'objectifs
Pour améliorer la performance de l'ensemble, il faut améliorer la performance des parties	Pour améliorer la performance de l'ensemble, il faut améliorer les relations entre les parties
Considère qu'une politique qui réussit à court terme assure le succès à long terme	Considère que les conséquences imprévues et différées de la plupart des solutions rapides neutralisent et annulent les gains immédiats au fil du temps

Parallèlement, Kallemeyn et al. (2019) définissent la théorie de la complexité comme moyen de recentrer l'évaluation sur les systèmes et environnements complexes. Comme la théorie de la complexité transcende les sciences sociales, physiques et naturelles et que les chercheurs de ces domaines l'ont interprétée de différentes manières, il n'est pas surprenant qu'il n'y ait pas de définition commune de la théorie de la complexité. Au sens large, la théorie de la complexité ne se réfère pas à une théorie ou à un ensemble d'idées, mais constitue plutôt un terme générique pour un ensemble de concepts qui partagent des hypothèses similaires sur la nature de la réalité et sur la manière dont les chercheurs parviennent à connaître cette

réalité. De la même manière qu'il existe différentes notions de méthodes mixtes de recherche, la théorie de la complexité est une famille de concepts théoriques et d'approches méthodologiques qui peuvent être compris à travers différentes optiques philosophiques, disciplinaires et pratiques. Le tableau suivant propose et résume quatre façons de conceptualiser la théorie de la complexité l'implication pour les méthodes mixtes de recherche scientifique.

Tableau 3.3. Quatre conceptualisations de la théorie de la complexité et implications pour la recherche à méthodes mixtes. Source : Kallemeyn et al. (2019).

Conceptualisation de la théorie de complexité	Définition	Implication pour les méthodes mixtes de recherche
La théorie de la complexité comme paradigme alternatif à la recherche scientifique	Approche de recherche scientifique fondée sur les hypothèses suivantes : interconnexion, non-linéarité, et incertitude	Possibilité d'ancrer l'ensemble de la recherche sur les méthodes mixtes dans la théorie de complexité en tant qu'approche de l'enquête
La théorie de la complexité en tant qu'étude des systèmes complexes	Présenter les phénomènes comme un système complexe	Déterminer s'il convient d'étudier le phénomène en question en tant que système complexe
La théorie de la complexité comme cadre théorique	Utilisation des concepts de complexité pour encadrer les phénomènes étudiés	Possibilité de construire un cadre théorique utilisant des concepts de complexité
La théorie de complexité en tant que méthodologies et méthodes conformes à la complexité	Méthodes et méthodologies qui sont bien adaptées pour saisir la complexité	Examiner dans quelle mesure les différentes méthodologies sont adaptées à la complexité ; sélectionner la méthodologie qui prend en compte les dimensions de la complexité

Dans le prolongement de cette diversité conceptuelle, Wolfram (2002) insiste sur le fait que la complexité devient en soi un objet d'étude. Il distingue deux formes de complexité : la complexité aléatoire, synonyme de désordre et d'absence de régularité, et la complexité organisée, qui met l'accent sur la structure et l'agencement des phénomènes. Sayama (2015) confirme cette distinction entre complexité désorganisée et complexité organisée, inspirée des travaux de Weaver (1948). Cette distinction repose sur la nature des interactions entre les éléments d'un système : la complexité désorganisée concerne des ensembles de composants indépendants, comme un gaz parfait, dont le comportement global peut être modélisé par des outils statistiques. En revanche, la complexité organisée se manifeste dans des systèmes composés d'éléments interdépendants interagissant entre eux, donnant lieu à des dynamiques

collectives imprévisibles à partir des seules règles locales. Ces systèmes sont des exemples typiques de systèmes biologiques, sociaux et urbains. La science des systèmes complexes s'intéresse précisément à cette zone intermédiaire, là où les interactions organisées génèrent des formes et des dynamiques globales irréductibles, échappant aux approches simplificatrices ou purement probabilistes. Complétant cette perspective, Dauphiné (2003) situe la complexité à l'interface entre l'ordre et le désordre, soulignant ainsi son positionnement intermédiaire.

De son côté, Holland (2014, p.29-30) observe que, dans le cadre de son développement, le champ des études de la complexité s'est scindé en deux grandes approches : l'étude des systèmes physiques complexes « *complex physical systems* » (CPS) et celle des systèmes adaptatifs complexes « *complex adaptive systems* » (CAS). Les CPS se caractérisent par des éléments disposés géométriquement (comme les automates cellulaires), avec des interactions locales régies par des lois fixes et uniformes. Cette approche a permis de mieux comprendre des phénomènes tels que la formation de motifs « *pattern formation* ». À l'opposé, les CAS concernent des systèmes composés d'agents adaptatifs, capables d'apprentissage ou d'évolution, comme les sociétés humaines ou les villes, et exigent donc des outils conceptuels et méthodologiques spécifiques pour saisir leur dynamique. Cette distinction, bien qu'un peu schématique, permet de mieux comprendre les différentes formes de complexité et d'adapter les méthodes d'analyse en fonction des systèmes étudiés. Les systèmes physiques complexes (CPS), aux règles fixes et interactions régulières, se prêtent à des modèles formels, utiles pour simuler des phénomènes comme la formation de motifs. À l'inverse, les systèmes adaptatifs complexes (CAS), composés d'agents capables d'apprendre et d'évoluer, exigent des approches plus souples, comme la modélisation multi-agents, capables de saisir des dynamiques non prévisibles. Ainsi, cette distinction aide à orienter le choix des outils théoriques et méthodologiques selon que l'on traite de structures relativement stables ou de systèmes ouverts et évolutifs.

1.3. Des systèmes aux systèmes complexes

Comme expliquée précédemment, la théorie de la complexité concerne l'étude et la compréhension des systèmes complexes. Avant de définir ce qu'est un système complexe, il est nécessaire de rappeler ce qu'est un système. Basiquement, Bertalanffy (1968) définit les systèmes comme ensembles d'éléments en interaction générant des comportements globaux. Selon Dauphiné (2003, p.83) un système est un ensemble d'éléments en interactions, une totalité organisée, plus ou moins ouverte sur l'environnement. Un système se distingue de son environnement, qui comprend tout ce qui est autour du système. De même, il est nécessaire de bien distinguer et de ne pas confondre l'analyse du système, la dynamique du système, et enfin la théorie des systèmes. La première est une méthode, la seconde est une technique et un langage, et la dernière est un ensemble de lois comme toutes les théories. Selon Mitchell (2009, p.295) et Theise (2023 p. 18-19), la réflexion scientifique s'est d'abord concentrée sur la notion de système, notamment développé par la cybernétique et la théorie générale des systèmes. Cette approche, apparue dans les années 1940-1950, mettait l'accent sur les relations entre les éléments plutôt que sur les éléments du système eux-mêmes, dans une ambition de compréhension globale. Toutefois, elle restait fondée sur l'étude de systèmes relativement stables et prévisibles. Face à la complexité des phénomènes vivants, sociaux ou

urbains, marqués par des dynamiques instables, et souvent imprévisibles, cette approche a montré ses limites. Cela a conduit à l'émergence de la notion de système complexe, caractérisé l'émergence de propriétés nouvelles et des comportements globaux résultant d'interactions locales.

Dans cette perspective, Balmaceda et Fuentes (2016) définissent un système complexe comme un système composé d'entités, appelées aussi agents, en interaction dynamique entre elles et avec leur environnement au moyen de règles simples. Ce type de système présente différentes propriétés principalement l'émergence, un comportement collectif difficile à prédire, et qui ne résulte pas d'un contrôleur central, en d'autres termes, autoorganisé. De même, West (2017, p. 22-24) définit le système complexe typique comme le système composé d'une myriade de constituants ou d'agents individuels qui, une fois agrégés, prennent des caractéristiques collectives qui ne se manifestent généralement pas dans les propriétés des composants individuels eux-mêmes, et qui ne peuvent pas être facilement prédites à partir de celles-ci. De plus, tous ces éléments interagissent, à des degrés divers, en permanence avec l'environnement extérieur. En général, un système complexe se caractérise par le fait que son ensemble est supérieur à la simple somme linéaire de ses parties. Dans de nombreux cas, l'ensemble semble prendre vie de lui-même, presque dissocié des caractéristiques spécifiques de ses éléments constitutifs individuels.

D'un autre côté, Mitchell (2009 p. 12-13) définit un système complexe comme un système dans lequel de vastes réseaux de composants sans contrôle central et des règles de fonctionnement simples donnent lieu à un comportement collectif complexe, à un traitement sophistiqué de l'information et à une adaptation par l'apprentissage ou l'évolution. Les systèmes dans lesquels un comportement organisé apparaît sans contrôleur ou leader interne ou externe sont parfois qualifiés d'autoorganisés. Étant donné que des règles simples produisent des comportements complexes difficiles à prévoir, le comportement macroscopique de ces systèmes est parfois qualifié d'émergent. Aussi, un système complexe peut être défini comme un système qui présente des comportements émergents et auto-organiseurs. La question centrale des sciences de la complexité est de savoir comment ce comportement émergent et autoorganisé se produit. Lorsqu'on les examine en détail, ces divers systèmes sont très différents, mais si on les considère à un niveau abstrait, ils ont en commun certaines propriétés intrigantes :

- Comportement collectif complexe : tous les systèmes que décrits ci-dessus sont constitués de vastes réseaux de composants individuels (fourmis, cellules, neurones, acheteurs d'actions, créateurs de sites web...), chacun suivant généralement des règles relativement simples, sans contrôle central ni leader. Ce sont les actions collectives d'un grand nombre de composants qui donnent naissance aux modèles de comportement complexes, difficiles à prévoir et changeants qui nous fascinent.
- Signalisation et traitement de l'information : tous ces systèmes produisent et utilisent des informations et des signaux provenant de leur environnement interne et externe.

- L'adaptation : tous ces systèmes s'adaptent, c'est-à-dire qu'ils modifient leur comportement pour améliorer leurs chances de survie ou de réussite, grâce à des processus d'apprentissage ou d'évolution.

Suivant une approche complémentaire, Sayama (2015, p. 03-04) définit les systèmes complexes comme des réseaux constitués d'un certain nombre de composants interagissant les uns avec les autres, généralement de manière non régulière et non prévisible. Ces systèmes peuvent apparaître et évoluer par auto-organisation, de sorte qu'ils ne sont ni complètement réguliers ni complètement aléatoires, ce qui permet le développement de comportements émergents à des échelles macroscopiques. Ces propriétés se retrouvent dans de nombreux systèmes du monde réel, par exemple les réseaux de régulation génétique au sein d'une cellule, les systèmes physiologiques d'un organisme, les cerveaux et autres systèmes neuronaux, le climat, les marchés boursiers, l'internet, les médias sociaux, les économies nationales et internationales, et même les cultures et civilisations humaines. En plus, Holland (2014 p. 24-28) confirme que chacun des différents systèmes complexes peuvent être décrits par l'expression courante : « *le tout est plus que la somme de ses parties* ». Les systèmes complexes présentent plusieurs types de comportements révélateurs. L'étude rigoureuse de ces comportements, notamment dans le cadre de la comparaison de systèmes complexes distincts, requiert l'application de méthodologies issues de diverses disciplines. Les modèles, les mesures et les concepts issus des différentes disciplines tel que : physique, biologie, informatique, économie et mathématiques, peuvent être mobilisés, mais leur application doit être novatrice afin de dégager des lois transversales aux différents systèmes complexes.

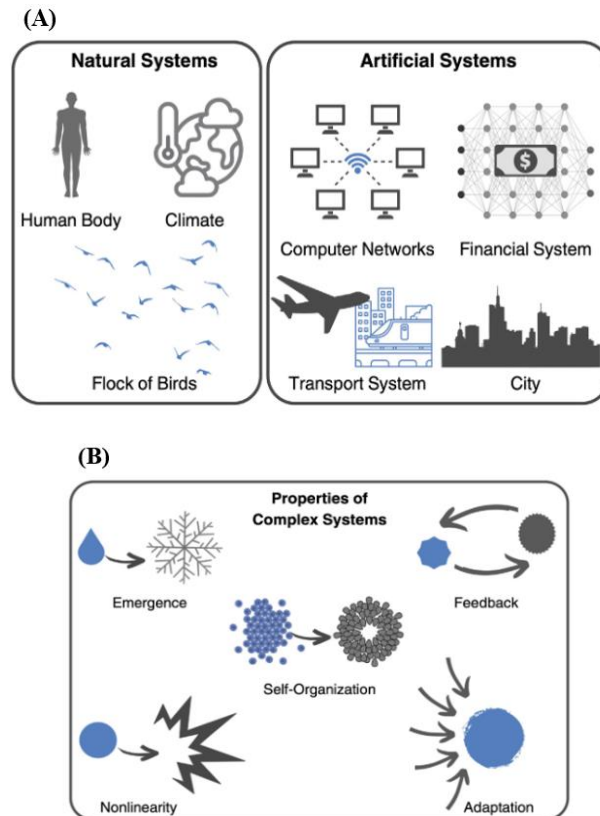


Figure 3.2. Les systèmes complexes, englobent : (A) Systèmes naturels et artificiels ; (B) Les caractéristiques et principes clés. Source : Fernandes (2023).

2. Notions fondamentales de la complexité

Comme exposé précédemment, les systèmes complexes se distinguent des autres systèmes par un ensemble de propriétés spécifiques. Ainsi, comme le déclare Sayama (2015, p. 4) : « *deux concepts fondamentaux s'appliquent à presque tous les sous-domaines des systèmes complexes : l'émergence et l'auto-organisation* ». Ces deux notions, associées à d'autres caractéristiques telles que l'adaptation ou la non-linéarité, constituent les notions fondamentales de la complexité qu'il est nécessaire de développer et de comprendre, en vue d'en examiner ensuite les applications possibles aux systèmes urbains.

2.1. Émergence

Holland (2014) confirme que l'émergence est le caractère fondamental qui permet de distinguer les systèmes complexes des autres types de systèmes. Selon Buš (2015, p. 20-21), il existe de nombreuses définitions de l'émergence, proposées par divers scientifiques, passés et contemporains, qui l'abordent selon leurs propres cadres théoriques et disciplinaires. Le concept d'émergence a ainsi été mobilisé dans plusieurs champs, notamment en philosophie, en théorie des systèmes, et dans les arts. D'un point de vue étymologique, le terme émergence provient du latin « *emergere* », signifiant surgir, apparaître ou se manifester.

Johnson (2001) définit l'émergence comme le passage de règles de bas niveau à des motifs de haut niveau (voir figure), résultant d'interactions complexes parallèles entre agents locaux, et identifie quatre principes fondamentaux de l'émergence : interaction locale entre voisins, reconnaissance de motifs, rétroaction et contrôle indirect. L'émergence désigne aussi la manière dont les systèmes complexes, ainsi que les structures, motifs, ordres ou régularités complexes, surgissent spontanément des interactions simples entre les composants d'un système à un niveau inférieur. En complément, Holland (2023) souligne que dans sa définition la plus simple et la plus courante, l'émergence désigne des propriétés d'un système qui ne peuvent être déduites de celles de ses composants individuels, autrement dit, quelque chose de plus que la somme de ses parties. L'émergence désigne donc un processus par lequel de nouvelles structures, motifs ou propriétés cohérentes apparaissent au sein des systèmes complexes. Elle se manifeste comme un phénomène dans lequel un tout organisé émerge spontanément à partir de l'interaction de composants internes qui, pris isolément, ne présentent pas de comportements complexes. Ces interactions, initialement simples, donnent lieu à un comportement global impossible à prédire ou à déduire uniquement à partir des propriétés des éléments constitutifs. Le comportement du tout s'avère ainsi qualitativement différent et souvent bien plus complexe que celui de ses parties.

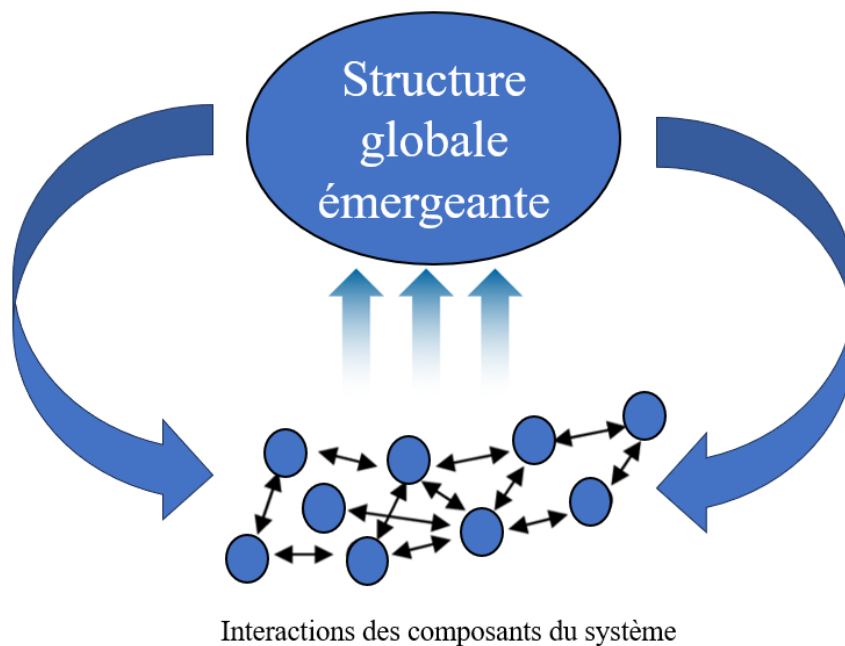


Figure 3.3. Schéma abstrait de l'émergence dans les systèmes complexes. Source : auteur.

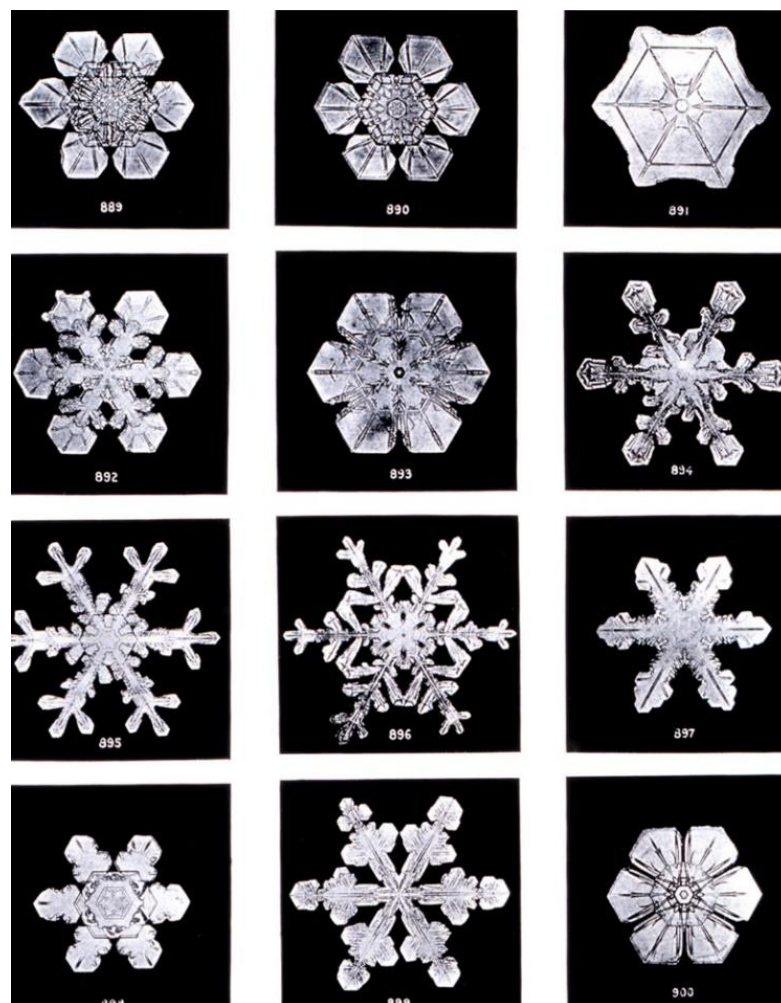


Figure 3.4. Les flocons de neige illustrant l'émergence par la formation de motifs fractals et symétriques. Source : <https://en.wikipedia.org/wiki/Emergence>, consulté en Décembre 2024.

Bus (2015) confirme que ces dernières années, le concept d'émergence occupe une place croissante en architecture et en urbanisme, où il constitue un cadre exploratoire à la conception de formes et de dynamiques complexes, à partir de techniques avancées et d'outils numériques (voir figures). Mobilisé à travers des approches mathématiques, physiques, géométriques ou algorithmiques, il alimente les recherches sur la morphogenèse, les nouvelles matérialités et les processus de fabrication urbaine dans des contextes marqués par l'incertitude et l'instabilité. L'émergence reflète la complexité inhérente au monde réel, et s'impose progressivement comme une stratégie à la fois conceptuelle et opérationnelle dans la pratique architecturale. Elle incarne ainsi une lecture transdisciplinaire de l'environnement bâti, intégrée aux dynamiques de développement urbain et aux transformations des territoires contemporains.



Figure 3.5. Application du concept d'émergence en architecture. Source : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-60919-5_8, consulté en décembre 2024.

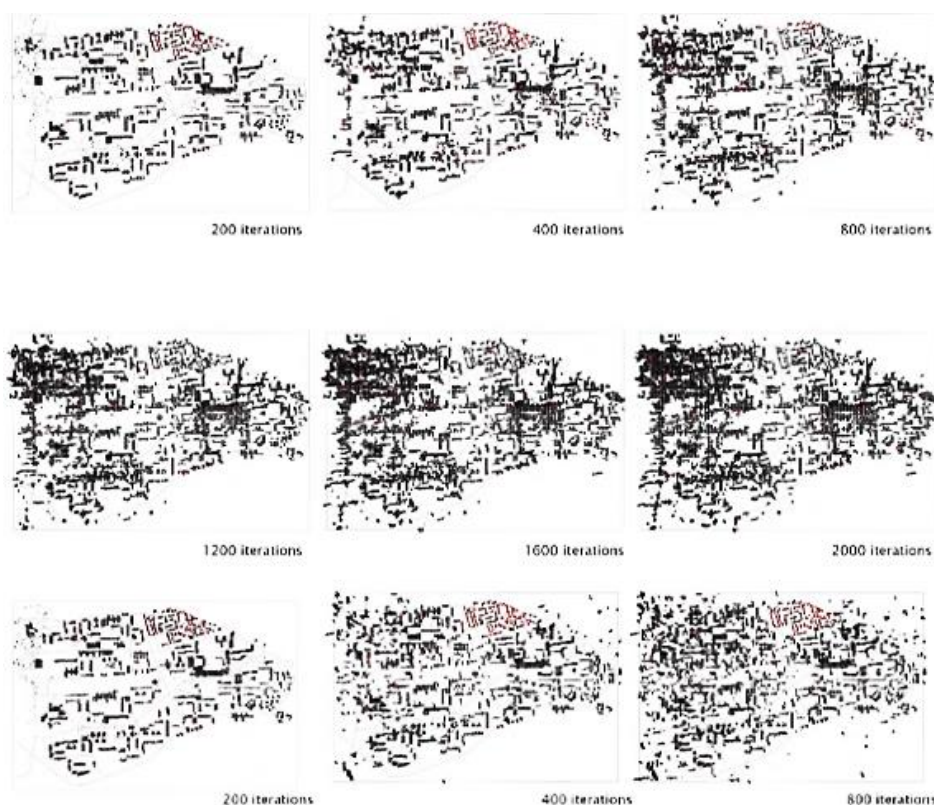


Figure 3.6. Simulation illustrant émergence de la forme urbaine par itérations. Source : Bus (2015).

2.2. Auto organisation

Selon Portugali (2000, p.49-50), l'auto organisation désigne la capacité d'un système complexe à générer spontanément un ordre spatio-temporel structuré à partir de ses propres dynamiques internes, sans intervention ni commande extérieure. Ce processus, déclenché par des mouvements et soutenu par les échanges d'énergie, de matière ou d'information avec l'environnement, permet au système d'émerger, d'évoluer et de s'adapter de manière créative. Il repose sur les interactions locales entre les éléments du système, dont la coordination décentralisée engendre une organisation globale cohérente. Un système peut être qualifié d'autoorganisé lorsque ses éléments interagissent pour produire une fonction ou un comportement global. L'auto-organisation est présentée comme une propriété fondamentale des systèmes complexes, initialement formulée dans les sciences exactes (physique, mathématiques, cybernétique), mais dont la portée dépasse ces domaines, s'appliquant désormais à des champs comme la biologie, les sciences sociales, la psychologie, et l'urbanisme.

Avec plus d'attention sur les systèmes urbains, l'auto-organisation, selon Allen (2005), est un processus par lequel des structures spatiales émergent spontanément à partir d'interactions locales entre des acteurs aux préférences hétérogènes, sans contrôle centralisé. Chaque acteur suit des règles simples, mais leurs interactions, parfois coopératives, parfois concurrentielles, font émerger des formes collectives cohérentes, bien que difficiles à prévoir. Contrairement aux modèles fondés sur l'équilibre, qui supposent un état final stable, l'auto-organisation montre que les structures urbaines peuvent évoluer, changer de forme et révéler de nouvelles propriétés. En résumé, l'auto-organisation permet de comprendre comment des formes urbaines peuvent naître sans plan central, à partir d'actions locales, dans un contexte instable et incertain. Le processus d'auto-organisation est sensible aux dynamiques, dépendant du chemin historique, et peut aboutir à une variété de structures urbaines possibles. Il est :

- Dynamique : il évolue dans le temps, à travers des instabilités et des bifurcations.
- Imprévisible : les mêmes conditions de départ peuvent produire des résultats très différents.
- Non linéaire : de petits changements peuvent avoir de grands effets.
- Décentralisé : aucun acteur ne contrôle l'ensemble du système.

Cependant, Mitchell (2009) souligne que la notion d'auto-organisation peut être critiquée lorsqu'elle est utilisée comme une simple étiquette explicative, sans réelle compréhension des mécanismes impliqués. Elle insiste sur l'importance d'étudier les systèmes concrets, plutôt que de chercher à appliquer de grands principes généraux à tous les cas. Selon elle, l'auto-organisation doit être analysée dans sa réalité propre, car ses manifestations varient d'un contexte à l'autre. Dans cette perspective, Park (2010, p. 38) affirme que, dans les systèmes urbains, la morphogenèse, entendue comme le processus de formation des formes, résulte d'interactions multiples entre entités locales. L'auto-organisation constitue alors un mécanisme central : elle désigne le processus par lequel des structures spatiales cohérentes émergent spontanément, à partir des interactions locales entre acteurs, sans qu'une autorité centrale ne les coordonne. C'est précisément à travers ces interactions que se produit le phénomène d'émergence, c'est-à-dire l'apparition de propriétés globales ou de formes macroscopiques qui ne peuvent être déduites directement du

comportement individuel des entités. Sur cette base, les formes urbaines apparaissent comme le résultat de dynamiques locales : motifs, regroupements, patterns d'habitat, qui, au fil du temps, s'agrègent pour former des structures plus complexes. La forme urbaine n'est donc pas figée. Elle est au contraire dynamique, en constante évolution, façonnée par les comportements et les actions des agents du système. L'auto-organisation, en tant que moteur de cette dynamique, permet ainsi de comprendre comment les formes urbaines se transforment sans planification centrale, par l'effet cumulatif des interactions locales.

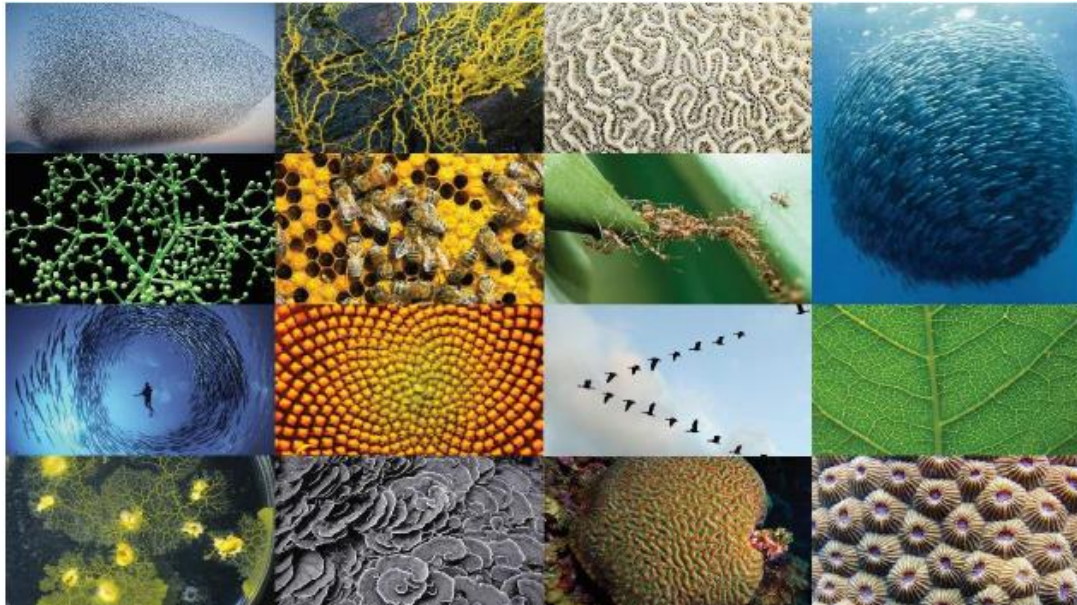


Figure 3.7. Manifestation de l'auto organisation dans différents systèmes naturels et biologiques. Source : <https://complexitylabs.io/>, consulté en décembre 2024.

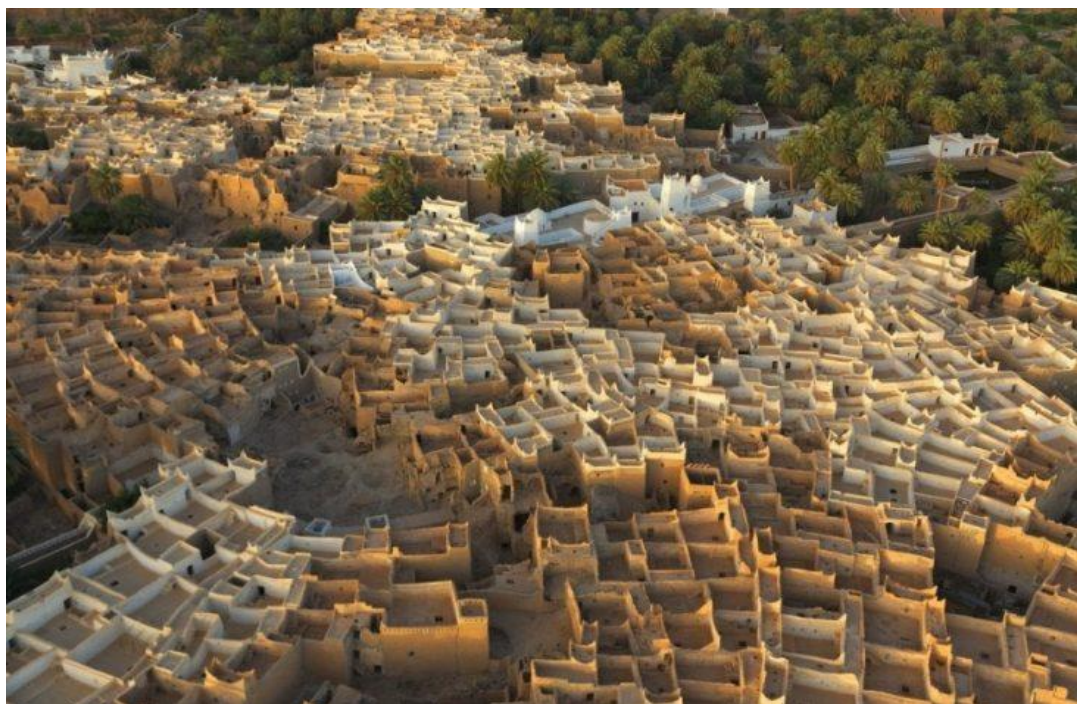


Figure 3.8. Médina de Ghadamès comme exemple de l'auto organisation dans la ville islamique traditionnelle. Source : <https://arkeonews.net/parts-of-the-city-of-the-old-city-of-ghadames-called-the-pearl-of-the-desert-collapsed-due-to-rainfall/>, consulté en décembre 2024.

Les deux notions de l'émergence et de l'auto-organisation s'articulent avec d'autres propriétés essentielles des systèmes complexes, telles que l'adaptabilité, la rétroaction (ou *feedback*), qui peuvent être sommairement définies ci-dessous :

- **Rétroaction « *Feedback* »**, Theise (2023, p.34-36) définit le feedback comme un mécanisme fondamental des systèmes complexes, dans lequel la sortie d'un système revient en entrée, influençant ainsi son évolution. Il distingue le feedback positif, qui amplifie les changements (menant à des comportements chaotiques ou accélérés), et le feedback négatif, qui stabilise et régule le système. Ces boucles de rétroaction permettent aux systèmes complexes de s'autoorganiser, de rester sensibles aux perturbations, et d'évoluer de manière imprévisible. Le feedback est ainsi au cœur des dynamiques émergentes observées dans les systèmes biologiques, sociaux et cognitifs.
- **Adaptabilité**, Miller (2015, p.12-13) définit l'adaptabilité comme la capacité des agents ou des systèmes à modifier leur comportement en réponse aux changements de leur environnement. Cette aptitude repose sur des mécanismes tels que l'apprentissage, la mémoire et l'évolution, permettant aux entités de survivre, d'innover ou de s'ajuster face à l'incertitude. L'adaptabilité est ainsi essentielle à la robustesse des systèmes complexes, car elle leur confère une souplesse évolutive face aux perturbations plutôt qu'une simple résistance structurelle.

3. Aperçu historique, quatre générations de la complexité

Comme mentionné précédemment, depuis la seconde moitié du XXe siècle, l'évolution des théories de la complexité témoigne d'une transformation progressive des cadres conceptuels et méthodologiques mobilisés pour comprendre différents phénomènes. Ce champ inter/transdisciplinaire, né en réaction aux limites des approches analytiques et déterministes traditionnelles, s'est constitué à la croisée de plusieurs disciplines. L'examen de cette trajectoire historique permet de comprendre comment les apports théoriques successifs ont progressivement conduit à l'élaboration d'un cadre scientifique pertinent pour l'étude des systèmes urbains et des dynamiques de morphogenèse. À l'exemple de plusieurs auteurs, Cambien (2007) et Alhadeff-Jones (2008) proposent de retracer cette évolution à travers trois grandes générations, chacune marquant un approfondissement dans la compréhension des notions mobilisées. Plus récemment, Stephan (2019), s'appuyant sur les travaux de Castells (2010), suggère l'apparition d'une quatrième génération depuis les années 2000-2010. Sur la base de ces références, nous résumons ci-après une esquisse de l'évolution historique des théories de complexité.

3.1. Première génération, années 1940-1950

Elle correspond à l'apparition de la notion de complexité organisée dans les sciences après la seconde guerre mondiale. Cette génération se fonde sur quatre approches majeures. D'abord, la théorie mathématique de la communication (Shannon, 1947) permet de quantifier l'information, en l'analysant à travers les notions d'entropie, de bruit et de redondance, offrant un cadre pour modéliser les flux informationnels dans des systèmes organisés. Ensuite, les théories des automates et des réseaux de neurones, issues des travaux de Turing (1936), aussi de McCulloch et Pitts (1943), modélisent des systèmes capables de traitement

automatique de l'information et d'apprentissage rudimentaire, préfigurant l'intelligence artificielle. Troisièmement, la cybernétique (Wiener, 1948), centrée sur la régulation et le feedback, introduit une représentation systémique des interactions entre l'information, le contrôle et l'adaptation dans les machines et les organismes. Enfin, la recherche opérationnelle, développée dans le contexte militaire, mobilise des équipes pluridisciplinaires pour résoudre des problèmes complexes en les réduisant à des modèles mathématiques optimisables. Ensemble, ces approches posent les bases d'un paradigme de la complexité où l'ordre, la structure et la finalité sont pensés en termes d'interactions régulées, modélisables et traitables par des systèmes formels.

3.2. Deuxième génération, années 1950-1980

Génération évoluant à partir des années 1950 dans un contexte de progrès technologiques, de guerre froide et de développement économique. Elle se distingue de la première par sa capacité à penser des systèmes ouvertement dynamiques, autoorganisés et non prévisibles, en rupture avec les visions purement mécaniques et déterministes. Cette génération s'appuie d'abord sur les sciences de l'ingénieur et de la computation, qui, face à des systèmes techniques et organisationnels complexes, développent des notions comme la complexité algorithmique, descriptive ou computationnelle. Elle est aussi portée par les sciences de gestion et la naissance de l'intelligence artificielle, qui cherchent à modéliser la prise de décision humaine via des approches heuristiques, c'est-à-dire chercher des solutions suffisantes plutôt qu'optimales, en s'appuyant sur l'expérimentation, l'intuition et l'ajustement progressif. Approches permettant de formuler des hypothèses ou de comprendre des systèmes complexes sans en maîtriser tous les paramètres, tout en acceptant des solutions approximatives mais pertinentes.

Parallèlement, la théorie des systèmes générales de Bertalanffy (1968) proposent une vision unifiée de la complexité organisée à travers des structures et interactions. Le tournant majeur de cette génération réside dans les théories de l'auto-organisation et des dynamiques non-linéaires : les travaux de Prigogine et Nicolis (1967) sur les structures dissipatives, la théorie du chaos, et la théorie des catastrophes (Thom, 1977) ou encore les fractales (Mandelbrot, 1975) montrent comment ordre et désordre interagissent, produisant des formes imprévisibles mais organisées. La complexité devient ainsi un phénomène émergent, issu de l'interaction entre fluctuations internes et contraintes environnementales. Enfin, en biologie évolutionnaire, des concepts comme l'autopoïèse, la coévolution, renforcent cette compréhension systémique et adaptative (Maturana et Varela, 1972). Cette deuxième génération marque donc une étape clé : elle pense la complexité comme évolution, instabilité créatrice et auto-organisation, bien au-delà du simple ordre prévisible des premières approches.

3.3. Troisième génération, années 1980-2000

Cette génération est apparue à partir années 1980. Le discours s'est déplacé de l'étude du système, ou la systémique, vers l'étude de la complexité elle-même. Elle se développe selon deux grandes orientations :

- La première, ancrée dans le monde anglo-saxon, est centrée sur les systèmes adaptatifs complexes (CAS), étudiés notamment au Santa Fe Institute (Etats-unis). Ces recherches associent modélisation mathématique, simulations informatiques et

biologie évolutionnaire pour comprendre comment des systèmes naturels, sociaux ou artificiels s'autoorganisent et évoluent à partir de règles simples. Parmi les travaux pionniers, on retrouve les algorithmes génétiques (Holland, 1992), réseaux booléens (Kauffman, 1993), la criticalité auto-organisée (Bak, 1996) et automates cellulaires (Wolfram, 2002). Ces approches suivent une logique ascendante « *bottom-up* », simulant la complexité par la création de règles locales plutôt que par des théories globales.

- La seconde voie, plus présente dans les pays latins notamment la France, adopte une posture épistémologique et réflexive, cherchant à penser la complexité en termes de valeurs, éthique et responsabilité scientifique. Cette orientation est notamment portée par Morin (1986 ; 2005), dont la pensée critique dépasse les dualismes traditionnels (objectivisme/constructivisme) et propose une connaissance auto-éco-ré-organisatrice, articulée autour d'une approche transdisciplinaire, ouverte, et consciente des limites de la science moderne. En mettant en relation la science, la philosophie, la biologie et les sciences humaines, Morin plaide pour une pensée complexe, fondée sur l'interconnexion des savoirs, la reconnaissance de l'incertitude, et une responsabilité éthique dans la construction du savoir.

3.4. Quatrième génération, depuis les années 2000

À partir des années 2000, on assiste à une intensification des recherches mobilisant les théories de la complexité dans des domaines concrets, en particulier dans les études urbaines et les sciences sociales. Plusieurs travaux ont contribué à cette évolution, en articulant la complexité à des enjeux géographiques, sociaux et technologiques contemporains. Batty (2005 ; 2013), dans la continuité de ses travaux sur les villes comme systèmes complexes, a démontré la pertinence des outils issus de la science des systèmes complexes (modélisation multi-agents, automates cellulaires, réseaux spatiaux et fractales) pour saisir les dynamiques d'évolution urbaine. De son côté, O'Sullivan (2000, 2004) se concentre sur la complexité dans le champ des systèmes d'information géographique (SIG), en plaidant pour une géographie computationnelle sensible aux dynamiques non-linéaires et aux interactions multiples à différentes échelles. Aussi, Castellani (2009), applique les théories de la complexité à la sociologie en concevant la société comme un système complexe adaptatif, où les phénomènes sociaux émergent des interactions dynamiques entre acteurs, sans centralisation. Il combine méthodes qualitatives et quantitatives (réseaux sociaux, modélisation multi-agents...) et propose une vision interdisciplinaire des sciences sociales complexes.

Stephan (2019) souligne que dans ce contexte émerge une nouvelle orientation, qualifiée de complexité appliquée, qui marque une transition décisive entre l'élaboration théorique et l'opérationnalisation interdisciplinaire des concepts de complexité. Cette approche se caractérise par la mobilisation des cadres de la complexité dans des champs variés, au-delà des disciplines fondatrices. Dans le domaine urbain en particulier, cette génération est marquée par une volonté de traduire la complexité en outils d'analyse, d'aide à la décision, et de modélisation des dynamiques territoriales. Les villes sont pensées et conçues non comme des objets finis, mais comme des systèmes en perpétuelle transformation, soumis à des interactions multiples, à des processus d'émergence et d'auto-organisation non prédictibles. Cette orientation ouvre ainsi la voie à une compréhension plus fine de la morphogenèse urbaine, en intégrant les dimensions sociales, spatiales, et environnementales

dans un cadre systémique, dynamique et évolutif. Les figures 3.9 et 3.10 schématisent l'évolution historique des théories de la complexité ainsi la complexité appliquée.

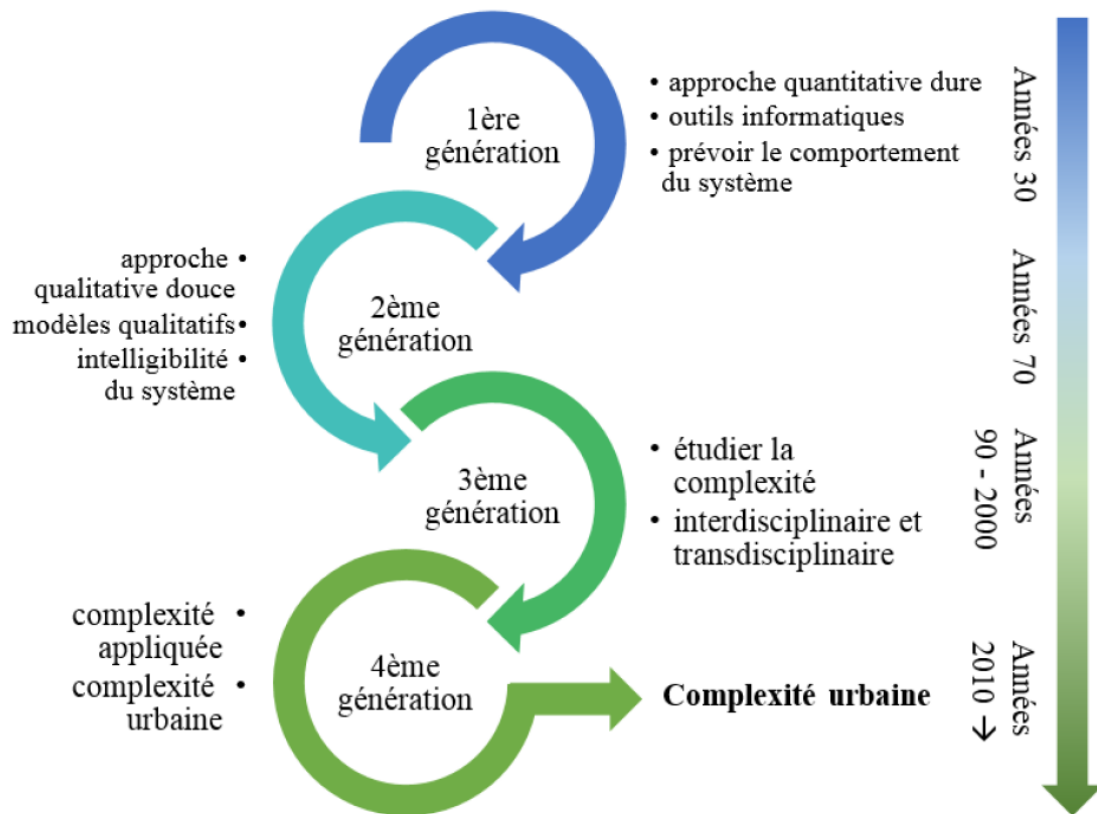


Figure 3.9. Evolution historique des théories de la complexité en quatre générations. Source : Stephan (2019).

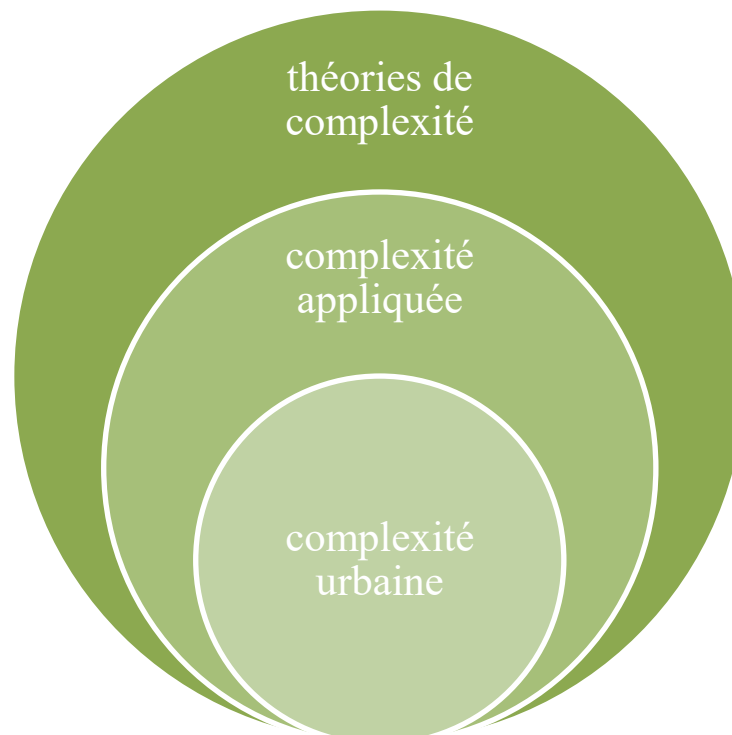


Figure 3.10. Abstraction de l'application des théories de complexité en études urbaines selon Stephan. Source : auteur.

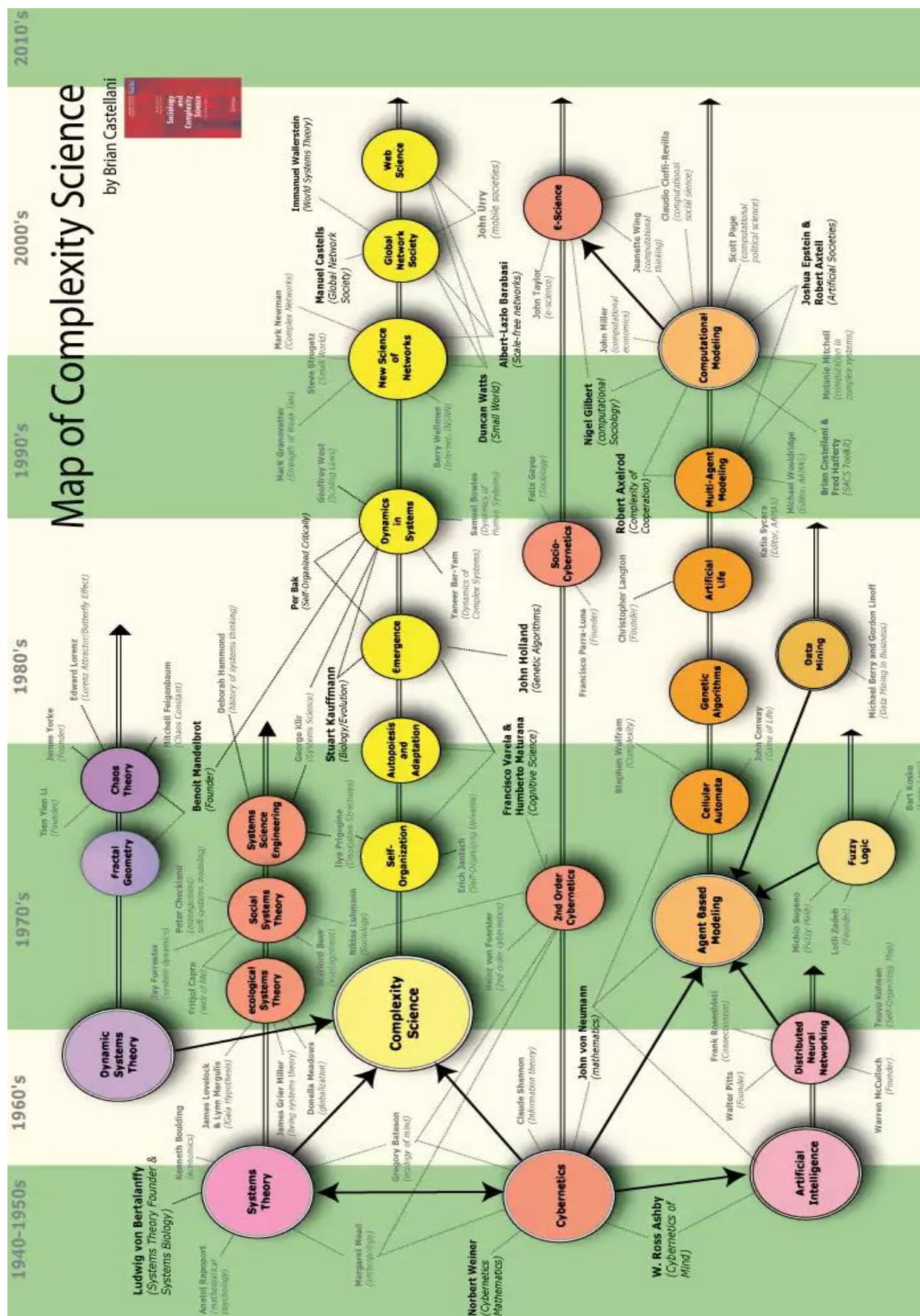


Figure 3.11. Carte schématique illustrant l'évolution historique des théories de la complexité. Source : Castellani (2009).

4. Théories de complexité appliquées à l'urbain

La complexité urbaine comme application des théories de complexité à l'urbain, s'inscrit dans la continuité du tournant entamé par la quatrième génération des théories de la complexité, marquant le passage d'un cadre conceptuel abstrait à des applications concrètes dans divers domaines, en particulier celui de l'urbain. La ville, par sa nature hétérogène, évolutive et multi-échelle, s'impose dès lors comme un objet paradigmatique des sciences de la complexité (Batty, 2005). En effet, les prémices de ce changement remontent à une période antérieure à la quatrième génération : une nouvelle perspective s'esquissait déjà, invitant à considérer les phénomènes urbains non plus comme le résultat d'une planification linéaire, mais comme des processus émergents issus d'interactions locales, multiples et souvent imprévisibles (Pumain, 1998). L'étude de la morphogenèse urbaine se transforme ainsi, elle devient l'analyse de formes et de structures produites par l'auto-organisation et l'adaptation au sein d'un système dynamique. La complexité urbaine ne se limite plus à la seule constatation de la diversité ou de la densité des formes urbaines, elle incarne le changement de paradigme déjà amorcé par les générations précédentes de la pensée complexe (Wohl, 2018).

En effet, cette nouvelle lecture trouve les prémices dans les travaux de Jacobs (1961) et de Alexander (1965) qui ont constitué une avant-garde et marquaient les premières ruptures avec les conceptions dominantes de l'urbanisme moderne, en introduisant une lecture plus organique et complexe des villes (voir figure 3.12). Jacobs met en avant le fait que l'ordre urbain émerge spontanément des interactions sociales quotidiennes. Selon elle, la ville fonctionne par auto-organisation : l'organisation globale résulte des comportements locaux, sans plan centralisé. En introduisant la notion de complexité organisée « *organized urban complexity* », elle compare la ville à un organisme vivant, composé de fonctions multiples et interconnectées. Cette approche ouvre la voie à une lecture systémique et dynamique des processus de formation urbaine. De son côté, Alexander critique la vision hiérarchique et rigide de la ville défendue par l'urbanisme fonctionnaliste, et lui oppose une organisation en demi-treillis « *semi-lattice* », qu'il juge plus fidèle à la réalité des villes autoorganisées. Tous deux défendent ainsi une conception de la ville comme système vivant, dont la forme émerge des interactions, de l'adaptation et de la coévolution entre ses différentes composantes.

Stephan (2019) souligne, dans cette continuité critique, que la planification urbaine moderne, fondée sur la rationalité, la prévisibilité et le contrôle, est souvent dépassée face à la complexité des villes, issue d'interactions multiples à différentes échelles. Bien que des approches comme l'analyse statistique ou la participation citoyenne aient été introduites pour mieux comprendre cette complexité, elles restent souvent simplifiées. En réalité, il manque encore des méthodes réellement adaptées pour en saisir la profondeur. D'où le besoin d'outils de planification plus souples et adaptatifs, capables de mieux répondre aux dynamiques évolutives des processus urbains. La ville n'est pas simplement un système. C'est en quelque sorte un système de systèmes, dans lequel nous pouvons identifier de nombreux sous-systèmes, ou réseaux, tels que : système d'espace public, système de transport, système énergétique, système social, système de communication, système d'éducation, système de santé, système de gouvernance, et autres.

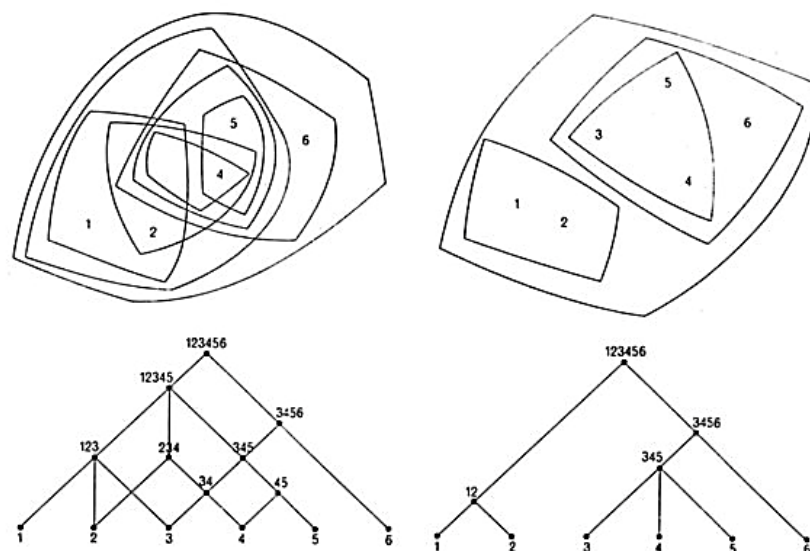


Figure 3.12. Hiérarchie de la structure urbaine dans les villes traditionnelles et modernes. Source : Alexander (1965).

De son côté, Cambien (2007) souligne que l'un des apports majeurs des systémiciens, dans leur effort de constitution d'une science des systèmes complexes, est l'attention portée aux systèmes sociaux, et tout particulièrement à la ville. En effet, la complexité permet de mieux comprendre l'imprévisibilité inséparable aux processus urbains, souvent autonomes et dynamiques, et de développer des méthodes d'orientation adaptées au changement urbain. Dans ce cadre, West (2017) définit un système complexe comme un ensemble composé d'un grand nombre d'éléments (ou agents) interconnectés, dont les interactions locales produisent des comportements globaux émergents, impossibles à déduire des propriétés des éléments individuels. La complexité, selon lui, réside dans ces propriétés émergentes issues d'une multitude d'interactions, qu'il s'agisse de cellules, de personnes ou d'entreprises, dont les effets collectifs sont fondamentalement imprévisibles. Transposée à la ville, cette définition donne lieu à la notion de complexité urbaine : la manière dont les structures sociales, physiques et économiques émergent de millions d'interactions humaines quotidiennes, véhiculées par des réseaux d'infrastructure, d'énergie, d'information ou de ressources. Conséquemment, il devient logique et nécessaire d'appliquer les outils conceptuels et méthodologiques de la science des systèmes complexes aux études urbaines, afin de dépasser les approches descriptives ou sectorielles, et de construire une véritable science de la ville, capable de penser sa croissance, sa résilience et ses enjeux de durabilité dans un monde toujours plus urbanisé.

C'est dans ce contexte qu'apparaît, à partir des années 2000, un nouveau champ d'étude : celui de la complexité urbaine. Cette approche, regroupant des notions telles que l'auto-organisation, l'émergence, et bien d'autres, propose une lecture renouvelée des systèmes urbains. Elle s'inscrit dans le prolongement de la complexité appliquée, elle-même ancrée dans l'ensemble plus vaste des théories de la complexité. Cette complexité urbaine, appliquée à l'analyse des dynamiques de la ville, est désignée sous le nom de « *Complexity Theories of Cities* » (CTC), que Portugali (2012) définit comme un ensemble d'approches théoriques et méthodologiques appliquant les principes des théories de la complexité à l'étude des villes conçues comme des systèmes complexes autoorganisées. Il précise : « *Les CTC ne sont pas une théorie urbaine unique, mais un corpus interdisciplinaire qui utilise des outils et concepts issus de la physique du chaos, de la théorie des systèmes complexes, de la biologie*

(auto-organisation, morphogenèse), des mathématiques (fractales, réseaux), mais aussi de la cognition spatiale. Les CTC ont permis de réunir sous une même grille de lecture des phénomènes urbains auparavant étudiés de manière isolée, en les interprétant à travers les principes de la complexité : non-linéarité, émergence, auto-organisation, ordre-chaos. ». Néanmoins, il identifie cinq grands potentiels des CTC qui restent à développer :

- Approfondir l'analyse des dynamiques de long terme des villes.
- Équilibrer les approches quantitatives et qualitatives.
- Relier les CTC aux théories urbaines critiques afin de saisir les dimensions politiques de l'auto-organisation.
- Fonder une théorie de l'urbanisme et du design urbain basée sur la complexité.
- Développer une approche cognitive des CTC, en reconnaissant que les villes sont des artefacts composés d'agents dotés de capacités mentales.

Simultanément, Batty (2013) en montrant que la complexité urbaine appelle à une approche scientifique renouvelée ; il défend la nouvelle science des villes « *The new science of cities* » qui propose une nouvelle manière d'étudier, de comprendre et de concevoir les villes. Il démontre que les villes ne peuvent plus être comprises uniquement comme des formes spatiales fixes ou de simples structures, mais doivent être analysées comme des systèmes dynamiques d'interactions, de flux et de réseaux. En appliquant les principes de la complexité, tels que l'auto-organisation, les hiérarchies, les lois d'échelle et les structures fractales, à l'objet urbain, Batty révèle que la ville fonctionne comme un organisme vivant en constante évolution. Cette complexité, où les comportements locaux génèrent des formes globales imprévues, nécessite une science propre à la ville, fondée sur l'analyse des relations plutôt que des localisations.

En effet, les nouvelles théories de la complexité urbaine (CTC) s'inscrivent dans la continuité d'un ensemble de travaux pionniers entamés dès les années 1980. Peter Allen, ancien collaborateur de Prigogine, fut l'un des premiers à appliquer les principes de la complexité aux villes (Allen et Sanglier, 1981), en proposant une lecture dynamique et non linéaire de leur évolution. Dans un autre registre, Tobler (1979) a introduit l'usage des automates cellulaires pour simuler les dynamiques spatiales urbaines, en modélisant l'espace comme une grille de cellules soumises à des interactions locales. Il montre ainsi comment des règles simples peuvent engendrer des structures urbaines complexes, illustrant les principes d'émergence et d'auto-organisation propres aux systèmes complexes. Ce cadre computationnel a inspiré des travaux majeurs, comme ceux de Couclelis (1985) et de White et Engelen (1993). En même temps, Batty et Longley (1994) proposent une lecture novatrice de la ville en mobilisant la géométrie fractale pour analyser ses formes complexes et irrégulières. Ils montrent que les structures urbaines présentent des régularités à différentes échelles, suivant des lois de puissance et une organisation hiérarchique caractéristiques des systèmes complexes. En reliant forme et fonction, dynamique locale et structure globale, leur approche remet en question les modèles urbains classiques fondés sur l'ordre et l'homogénéité. Dans la même perspective, les travaux de Frankhauser (1994) marquent aussi une avancée décisive en montrant que les formes urbaines, irrégulières et hiérarchisées, peuvent être décrites par des structures autosimilaires. En analysant la dimension fractale des tissus et des réseaux urbains,

il propose une nouvelle lecture de la morphogenèse urbaine fondée sur les principes d'auto-organisation et de complexité.

Dans ce nouveau champ des CTC, Portugali (2012) distingue deux dimensions complémentaires : d'une part, une dimension quantitative, déjà largement exploitée à travers les outils computationnels ; d'autre part, une dimension qualitative, qui appelle à une transformation épistémologique profonde dans la manière de concevoir, de percevoir et de planifier la ville. Dans le même raisonnement, Batty et Marshall (2012) appellent à une approche davantage méthodologique épistémologique et historique, en soulignant que les CTC constituent un véritable changement de paradigme dans l'étude urbaine. Elles rompent avec les visions mécanistes, fonctionnalistes et déterministes du XXe siècle pour proposer une conception de la ville comme système complexe adaptatif. Poursuivant cette réflexion, Sengupta (2017) considère les CTC comme un cadre théorique et méthodologique intégratif, centré sur l'idée de la ville comme système adaptatif complexe. Il identifie trois grandes orientations :

- CTC en tant que critique épistémologique, elles remettent en question les paradigmes modernistes, technocratiques et fonctionnalistes, en introduisant une lecture de la ville inspirée des sciences de la complexité.
- CTC en tant qu'outil de modélisation, elles mobilisent une large gamme de dispositifs : automates cellulaires, modèles multi-agents, réseaux complexes, syntaxe spatiale, analyse fractale, pour simuler et comprendre les dynamiques urbaines.
- CTC comme cadre pour la gouvernance, elles appellent à des formes de gouvernance adaptatives, participatives et distribuées, plus en phase avec l'incertitude, la variabilité et l'auto-organisation propres aux systèmes urbains contemporains.

De son côté, Marshall (2009) considère la ville comme un système complexe adaptatif, à la croisée du construit et du vivant. Les CTC permettent, selon lui, de dépasser les oppositions entre planification rigide et croissance spontanée, en valorisant l'émergence, l'auto-organisation et l'adaptabilité. Il met en avant les qualités des formes urbaines traditionnelles, issues de processus incrémentaux, en contraste avec les modèles modernes centralisés. Il mobilise la distinction établie par Weaver (1948) entre complexité organisée et complexité désorganisée, aussi la complexité organisée de Jacobs (1961) pour analyser les systèmes urbains. Selon son approche, la complexité désorganisée désigne des ensembles très vastes d'éléments sans relations apparentes ou prévisibles entre eux, des phénomènes que l'on peut traiter statistiquement. Dans cette catégorie, le désordre domine, et l'organisation est absente ou imperceptible. À l'inverse, la complexité organisée concerne des systèmes où un grand nombre d'éléments interagissent de manière structurée, produisant des formes d'ordre émergentes, sans pour autant qu'il y ait un schéma directeur ou un contrôle centralisé. La ville relève précisément de cette catégorie : elle est composée d'éléments hétérogènes (bâtiments, rues, habitants, institutions), dont les interactions constantes génèrent une organisation évolutive. Cette organisation n'est ni complètement planifiée, ni totalement chaotique, elle résulte d'un équilibre dynamique entre structure et spontanéité. Il distingue plusieurs types de complexité organisée (voir figure 3.13) :

- Artéfactuelle, complexité d'un objet conçu, exemple d'un bâtiment.

- Biologique, complexité d'un organisme vivant, exemple d'un arbre.
- Écologique, complexité d'un ensemble vivant en interaction, exemple d'une forêt.
- Systémique : complexité d'un réseau ouvert et adaptatif, exemple d'internet.

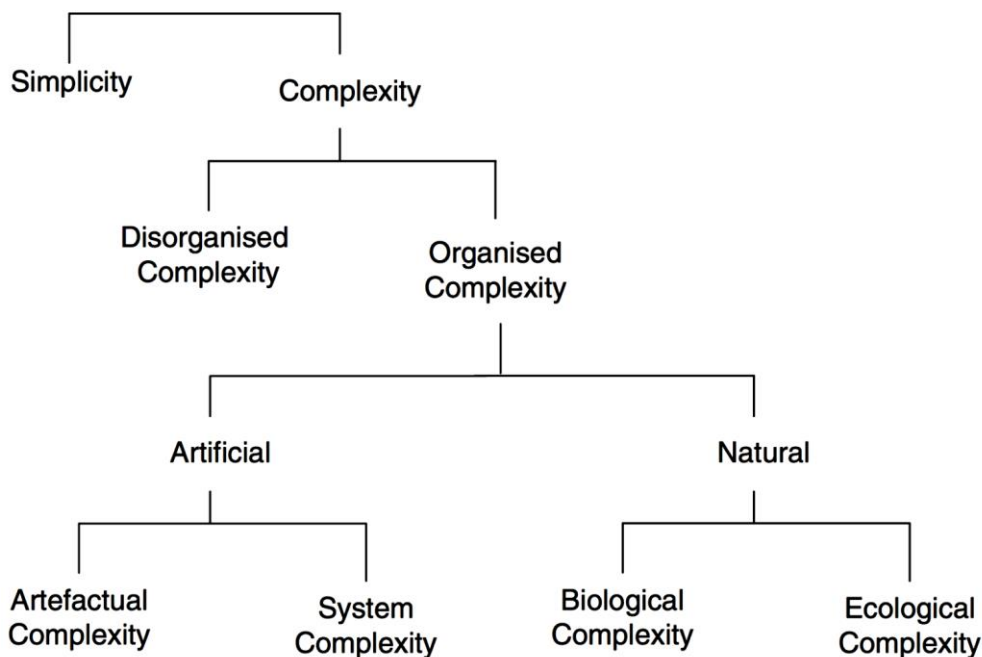


Figure 3.13. Schéma illustrant typologie de la complexité. Source : Marshall (2009).

5. Morphogenèse urbaine et théories de la complexité : modèles et méthodes

Après avoir esquissé les principes généraux de la complexité appliqués au champ urbain, il convient désormais d'interroger la portée opérationnelle à travers l'étude de la morphogenèse urbaine. Cette approche permet de considérer la ville non comme un objet figé, mais comme un processus évolutif issu d'interactions multiples. Les théories de la complexité offrent un cadre pour modéliser l'émergence, la transformation et l'organisation des formes urbaines. La morphogenèse devient ainsi un enjeu central, en rompant avec les visions statiques au profit d'une lecture dynamique et adaptative. Les formes urbaines apparaissent comme le résultat d'interactions locales entre agents simples et hétérogènes, générant des structures complexes à grande échelle. De ce fait, la ville est perçue comme un système capable de produire et d'adapter ses formes par ses propres dynamiques. Les outils issus de la science des systèmes complexes permettent d'analyser, de simuler et d'expérimenter ces transformations.

Ainsi, il est tout d'abord nécessaire de définir ce qu'est un modèle et ce qu'est une méthode, de manière générale, puis plus spécifiquement dans le cadre de la complexité. Mais avant cela, il convient de souligner les apports des théories de la complexité à la compréhension de la morphogenèse urbaine. Selon Portugali (2006), ces théories offrent un cadre global pour l'étude de la morphogenèse urbaine et, plus largement, des dynamiques urbaines. De son côté, Fusco (2018, p.74-78) affirme que, dans cette perspective, la forme de la ville est perçue comme un motif spatial « *pattern* » émergent des interactions entre les

composantes du système dans un espace défini. Les éléments microscopiques ne portent pas la forme en eux-mêmes ; ce sont les dynamiques d'interaction qui génèrent les formes macroscopiques, et mésoscopiques. Cette conception implique une attention particulière aux processus morphogénétiques. Il ajoute que les théories de la complexité permettent ainsi une lecture morphogénétique de la ville, en s'efforçant de comprendre comment les structures complexes émergent et se transforment.

Parallèlement, D'Acci (2019) définit la morphogenèse urbaine comme un processus évolutif et autoorganisé, résultant d'interactions locales multiples plutôt que d'un plan directeur les formes urbaines émergent de dynamiques complexes. Ce concept est inspiré des travaux en biologie comme celles de Turing. Dans cette perspective, la ville est un système complexe adaptatif, où les formes se forment à partir d'un enchevêtrement de microdécisions impliquant comportements individuels, règles sociales, flux économiques, contraintes géographiques et usages quotidiens. Pour comprendre ces transformations les concepts clés de la complexité doivent être mobilisés à l'aide de modélisation non prédictive mais explicative, utilisant des outils comme les automates cellulaires, les systèmes multi-agents, les graphes ou les fractales. Dans le même esprit, Wohl (2018) définit la ville comme un système complexe adaptatif, composé d'agents multiples interagissant localement, s'adaptant, apprenant et donnant naissance à des formes globales émergentes, un processus désigné comme morphogenèse. Ainsi, un lien fondamental peut être établi entre complexité et morphogenèse urbaine. À travers l'exemple des villes traditionnelles, cette morphogenèse urbaine spontanée peut être illustrée où la forme bâtie se développe progressivement à partir des pratiques locales, des contraintes spatiales et des dynamiques sociales. Loin du chaos, cette évolution produit des formes adaptatives, résilientes et en harmonie avec leur contexte naturel et culturel, révélant une intelligence spatiale distribuée que les théories de la complexité permettent de mieux comprendre et modéliser, par contraste avec les modèles planifiés et rigides de l'urbanisme moderne.

Ces différentes approches développant les apports de la complexité à la morphogenèse urbaine, insistent sur le modèle comme outil central et fondement de la compréhension et de la portée opérationnelle. Dans ce sens, Mitchell (2009) définit un modèle comme une représentation simplifiée d'un phénomène réel. Il constitue un outil central pour comprendre, expliquer et étudier la réalité. Dans le champ scientifique, il est à la fois représentation, explication et instrument de recherche. Les scientifiques, plutôt que d'observer directement la nature, élaborent des modèles qui en capturent certains aspects essentiels, selon les objectifs visés. Ces modèles peuvent être :

- Mathématique, comme formule ou équation.
- Mécaniste, basé sur une explication causale.
- Conceptuel, outil de compréhension.
- Prédicatif, comme outil de projection.
- Par Simulation, reproduction computationnelle de phénomènes complexes.

Avec plus d'intention sur l'urbain, Batty (2007) définit un modèle comme une abstraction ou une simplification du réel, servant d'outil pour comprendre, représenter,

prédire ou concevoir la ville. Il insiste sur son rôle autonome : le modèle ne se confond ni avec la théorie, ni avec la réalité, mais agit comme un médiateur entre les deux. Les modèles permettent d'explorer des hypothèses, de tester des scénarios de type « *what if ?* » et de simuler des dynamiques urbaines futures sans intervenir directement sur la réalité. Cette capacité expérimentale, rendue possible par l'informatique, place le modèle au cœur des démarches de planification contemporaine. Il peut prendre des formes variées :

- Iconique, peut être représentation matérielle ou visuelle fidèle, exemple de maquette, plans, ou des 3D.
- Symbolique, représentant abstraction fonctionnelle exemple des automates cellulaires, modèles land-use/transport, et les modèles multi-agents.
- Matériel / numérique, en fonction du support physique ou numérique.

Aussi, Batty (2007) définit méthode comme ensemble structuré de démarches (conception, formalisation, simulation, validation) permettant de construire et d'utiliser un modèle pour explorer ou concevoir la ville dans une logique scientifique, expérimentale et prospective. Elle comprend :

- La formalisation d'hypothèses sur le fonctionnement urbain.
- Leur traduction en modèle (symbolique, iconique, ou mixte).
- La calibration à partir de données empiriques.
- La validation (vérification de cohérence interne) et la vérification (cohérence avec le réel).
- L'expérimentation virtuelle (scénarios, simulations).
- La représentation et communication des résultats.

Dans le champ de la complexité, le modèle est généralement défini et conçu comme une représentation formelle, simplifiée et souvent mathématisée, d'un système complexe. Il vise à expliquer, simuler ou anticiper des phénomènes émergents à partir d'interactions locales entre agents. Phelan (2001) insiste sur le caractère génératif de ces modèles, tels que les automates cellulaires ou les modèles multi-agents, qui reposent sur des règles simples permettant de faire émerger des comportements collectifs complexes à l'échelle macroscopique. West (2017) voit le modèle comme un outil abstrait capable de révéler des régularités sous-jacentes derrière l'apparent désordre à travers les échelles. Le modèle peut ainsi servir à organiser des données, à interpréter des dynamiques, ou à soutenir la prise de décision. Différents types de modèles peuvent être distingués en complexité :

- Déterministes ou stochastiques.
- Spatialisés (structurés géographiquement).
- Dynamiques ou statiques.
- Empiriques, théoriques ou exploratoires.

- Fractals et évolutionnaires.

Quand a la méthode, elle renvoie à l'ensemble des démarches théoriques, conceptuelles et techniques mobilisées pour construire, simuler, calibrer et valider les modèles. Elle ne se réduit pas à un simple protocole technique, mais reflète une vision du système étudié, influençant profondément la forme et la logique du modèle développé (Phelan, 2001). Chez West (2017), la méthode correspond à une démarche scientifique rigoureuse, structurée en plusieurs étapes : l'observation empirique des régularités (telles que les lois d'échelle), la formulation d'hypothèses sur les mécanismes sous-jacents (comme les contraintes énergétiques ou les structures en réseau), la modélisation mathématique de ces hypothèses, et enfin leur vérification expérimentale ou empirique à partir des données disponibles. Ainsi, la méthode constitue le socle épistémologique sur lequel repose toute modélisation en science de la complexité. La Bella (1998) souligne que la méthode précède la construction du modèle et qu'elle s'incarne dans des approches diverses, fractales, évolutionnaires, ou issues de la théorie des catastrophes, chacune proposant une manière spécifique de formaliser l'auto-organisation, les bifurcations ou l'adaptation dans les systèmes complexes. Contrairement aux méthodes analytiques classiques fondées sur la causalité linéaire, la méthode en complexité privilégie la simulation, l'observation des comportements émergents et la détection de régularités plutôt que la recherche de lois.

Parallèlement, Sayama (2015 p. 3-4) confirme que dans la science des systèmes complexes un modèle est caractérisé par : sa simplicité (capacité à condenser la réalité en un schéma intelligible), sa validité (correspondance aux observations ou aux savoirs établis), sa robustesse (résistance aux variations de paramètres ou d'hypothèses). De plus, et dans une perspective historique sur les modèles en complexité (voir figure), il propose une lecture historique organisée autour de trois grandes phases, correspondent à des paradigmes méthodologiques distincts :

- Modèles descriptifs (antiquité – XIXe siècle) : utilisation de textes, diagrammes, dessins, modèles physiques pour représenter qualitativement des phénomènes. Ces modèles relèvent davantage de l'intuition, sans formalisme mathématique.
- Modèles quantitatifs mathématiques (XVIIe – XXe siècle) : introduction de modèles dynamiques via les équations différentielles ou de différences, permettant de formuler des lois générales (ex. : Newton, Kepler). Le modèle devient une structure mathématique rigoureuse, mais souvent limitée à des systèmes linéaires et déterministes.
- Modèles computationnels (depuis le milieu du XXe siècle) : avec les ordinateurs, émergence de nouvelles méthodes :
 - Automates cellulaires : grille de cellules obéissant à des règles locales.
 - Réseaux dynamiques : structures complexes, non régulières, inspirées des réseaux neuronaux et génétiques.
 - Modélisation multi-agents (ABM) : agents autonomes interagissant de façon émergente.

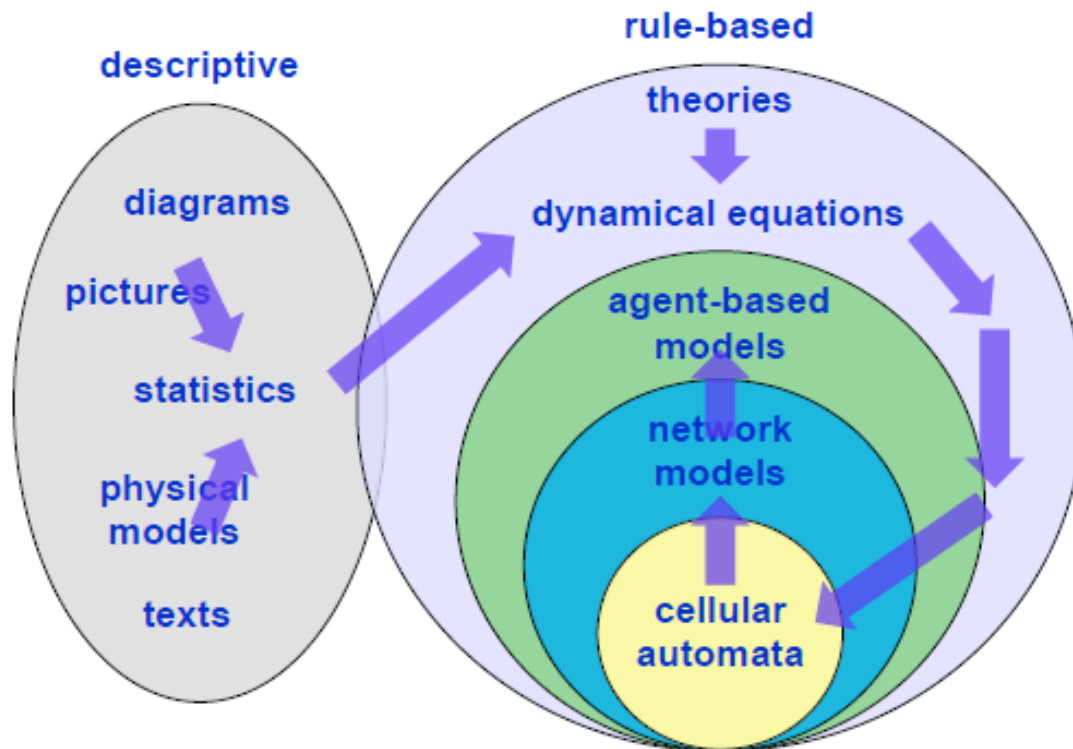


Figure 3.14. Illustration schématique de l'évolution historique des méthodologies de modélisation. Source : Sayama (2015).

De manière synthétique, Balmaceda et Fuentes (2016) présentent onze méthodes considérées comme des outils formels majeurs en science de la complexité, dont la plupart possèdent une longue tradition disciplinaire. L'approche des systèmes complexes se distingue par une manière singulière de mobiliser ces méthodologies classiques, en les articulant dans une perspective résolument quantitative et interdisciplinaire. Ces méthodes, largement éprouvées dans de nombreux domaines scientifiques, présentent un fort potentiel pour l'analyse urbaine en général, et pour la morphogenèse urbaine en particulier. Il s'agit notamment de :

- Dynamiques non linéaires « *Non-linear science* », les systèmes complexes, comme les sociétés humaines ou les villes, ne réagissent pas toujours de façon proportionnelle aux perturbations. Une petite modification par exemple, un changement politique ou économique mineur, peut provoquer un basculement majeur dans l'organisation urbaine : gentrification soudaine, effondrement d'un quartier, explosion démographique... Cette non-linéarité se traduit aussi par l'existence de trajectoires multiples possibles et d'une grande imprévisibilité dans le temps et l'espace. Ce phénomène, connu sous le nom de chaos déterministe, rend difficile toute prédiction exacte de l'évolution d'un système urbain, même lorsque ses règles de fonctionnement sont bien connues.
- Lois d'échelle « *Scaling* », les lois d'échelle expriment des relations mathématiques où un changement de taille entraîne un changement proportionnel d'une autre variable. Autrement dit, si on multiplie la taille d'un système par un certain facteur, certaines de ses propriétés évoluent selon une loi prévisible. Dans les systèmes complexes, ce type de régularité, souvent sous forme de lois de puissance, est fréquent et reflète parfois des dynamiques profondes à petite échelle. Dans le cas des villes, on observe ces lois dans plusieurs domaines : par exemple, la longueur totale du réseau routier, le nombre

d'interactions sociales ou le niveau d'innovation augmentent avec la taille de la population, mais pas de façon linéaire. Une ville deux fois plus grande n'a pas simplement deux fois plus de routes ou de brevets : elle en a souvent plus que le double. Ces régularités suggèrent l'existence de mécanismes partagés.

- Théorie de la bifurcation « *Bifurcation theory* », dans les systèmes sociaux, comme les villes, les dynamiques sont souvent non linéaires. Cela signifie qu'un petit changement dans certains paramètres (économiques, politiques, environnementaux...) peut provoquer une transformation radicale du système. C'est ce que décrit la théorie des bifurcations : lorsqu'un seuil critique est franchi, le système peut basculer vers un nouvel équilibre, parfois irréversible. Dans le contexte urbain, cela peut se traduire par exemple par la transformation soudaine d'un quartier suite à une politique publique, un événement climatique extrême, ou une évolution démographique, entraînant un changement durable de son organisation spatiale ou sociale.
- Formation de motifs « *Pattern formation* », dans la nature, des motifs réguliers apparaissent spontanément, comme dans les formes des coquillages, la peau des animaux ou la répartition de bactéries. Ce phénomène, étudié dans le cadre de la morphogenèse, repose sur des dynamiques simples qui génèrent des structures complexes dans l'espace et le temps. De la même manière, les villes se développent selon des régularités spatiales : répartition des fonctions (habitat, commerce, industrie), organisation des réseaux viaires, ou encore ségrégation socio-spatiale. Ces motifs urbains ne résultent pas toujours de décisions centralisées ; ils émergent souvent d'interactions locales entre habitants, règles d'occupation du sol, et dynamiques économiques.
- Théorie des réseaux « *Network theory* », la théorie des réseaux est un outil essentiel pour comprendre les interactions humaines et les dynamiques sociales. Elle permet d'analyser comment les individus, les groupes ou les institutions sont connectés, et comment ces connexions influencent les comportements collectifs. Dans le contexte urbain, la ville peut être vue comme un tissu de réseaux entremêlés : réseaux sociaux entre habitants, réseaux de transport (métro, routes, bus, avions), réseaux numériques (Internet, téléphonie), réseaux écologiques... Comprendre ces réseaux, leur structure et leur dynamique, est crucial pour analyser la complexité urbaine et les processus qui façonnent la ville.
- Théorie des jeux « *Game theory* », aussi appelée théorie des dilemmes sociaux, est un cadre analytique qui permet d'étudier les décisions prises par des individus lorsqu'ils interagissent dans un contexte où leurs choix dépendent de ceux des autres. Elle est essentielle pour comprendre les mécanismes de coopération, de conflit ou de défection dans les groupes humains. Appliquée au contexte urbain, cette théorie aide à analyser des situations typiques de la vie en ville, comme l'usage partagé de l'espace public (stationnement, propreté, bruit), la participation collective à des initiatives locales (jardins partagés, sécurité de quartier), ou encore les comportements face aux normes sociales et aux politiques publiques (recyclage, respect du code de la route). Ces interactions mettent souvent en tension l'intérêt individuel et l'intérêt collectif, un dilemme central dans les dynamiques sociales urbaines. La théorie des jeux fournit alors des outils pour modéliser et mieux comprendre ces choix stratégiques qui influencent l'organisation et l'évolution de la ville.

- Théorie de l'information « *Information theory* », développée à l'origine par Shannon, offre des outils puissants pour analyser les systèmes complexes. Elle repose notamment sur le principe de l'entropie maximale, qui permet de faire des prédictions sur la distribution la plus probable d'un phénomène à partir d'une information partielle. Ce principe est aujourd'hui largement utilisé en biologie ou en écologie pour modéliser des distributions de tailles, de ressources ou d'interactions dans des environnements complexes. Appliquée à la ville, cette approche permet d'analyser des régularités dans la répartition des ressources urbaines, des flux de mobilité, ou encore dans la taille des établissements, des parcelles, ou des distances parcourues. Par exemple, à partir d'un nombre limité de contraintes connues (comme la population totale ou la densité), la théorie de l'information peut aider à prédire la distribution des zones bâties ou des déplacements quotidiens. Elle constitue ainsi un outil formel pour explorer l'organisation spontanée des villes en tant que systèmes complexes.
- Mesures de complexité « *Complexity measures* », sont des outils statistiques qui cherchent à quantifier le degré d'organisation ou d'imprévisibilité d'un système. Bien que ce champ de recherche soit encore en développement, ces mesures permettent d'identifier des régularités et des caractéristiques communes entre des systèmes très différents, mais présentant un niveau de complexité similaire. Dans le contexte urbain, ces outils offrent un grand potentiel pour analyser la structure et le fonctionnement des villes. Par exemple, ils peuvent aider à repérer des motifs récurrents dans l'organisation spatiale, les réseaux de transport, ou les dynamiques sociales. En comparant différentes villes ou quartiers à l'aide de ces indicateurs, on peut commencer à détecter des signatures communes de complexité urbaine
- Automates cellulaires « *Cellular automata* », sont des modèles simples mais puissants qui permettent de simuler comment des comportements locaux peuvent produire des formes complexes à grande échelle. Utilisés dans des domaines comme la biologie ou l'épidémiologie, ils servent par exemple à modéliser la formation de motifs naturels ou la propagation d'une maladie. Dans le domaine urbain, les automates cellulaires sont particulièrement utiles pour simuler l'évolution des villes. En définissant des règles simples pour chaque cellule (par exemple : construction, densification, déplacement), on peut observer comment les décisions locales d'agents individuels comme les habitants, les promoteurs ou les autorités influencent la transformation globale du tissu urbain. Ils permettent ainsi de modéliser la morphogenèse urbaine comme un processus émergent, auto-organisé, né de multiples interactions locales.
- Modélisation à base d'agents « *Agent-based modeling* », est une méthode qui simule le comportement de nombreux agents individuels (comme des personnes, des véhicules ou des entreprises) pour observer comment leurs interactions locales donnent naissance à des dynamiques globales. Elle prolonge les automates cellulaires, mais avec des agents plus autonomes et mobiles, capables de prendre des décisions selon des règles définies. Dans le contexte urbain, cette approche est particulièrement puissante pour modéliser la ville comme un système complexe. Elle permet, par exemple, de simuler la formation de quartiers, les flux de transport, la diffusion d'innovations, ou les comportements en situation de crise (évacuation, congestion...). En reproduisant les choix individuels des habitants ou des acteurs économiques, la modélisation à base d'agents offre une manière intuitive et flexible de comprendre comment des phénomènes urbains émergent d'interactions multiples et locales.

- Exploration des données « *Data mining* », consiste à extraire automatiquement des motifs, des tendances ou des relations cachées à partir de grands ensembles de données. À l'ère du numérique, les villes produisent une immense quantité d'informations issues de sources variées : institutions publiques, entreprises, réseaux sociaux, capteurs urbains... Pourtant, malgré cette richesse, les mécanismes profonds qui gouvernent ces données restent souvent difficiles à comprendre. L'exploration de données permet alors deux choses essentielles : décrire les structures présentes dans les données (par regroupement, classification, détection d'anomalies...) et prédire des comportements futurs. Dans le contexte urbain, cette méthode permet, par exemple, d'identifier des schémas de mobilité, de consommation d'énergie, ou d'occupation du sol, et de révéler les dynamiques locales qui façonnent la ville. Elle joue ainsi un rôle central dans le développement d'une science des données urbaines, en aidant à mieux comprendre la ville comme un système complexe régi par de multiples interactions.

Ces méthodes et outils permettent d'analyser la ville comme un système dynamique en constante transformation, offrent ainsi des cadres efficaces et bien élargis pour modéliser la formation des structures urbaines à partir d'interactions locales et de dynamiques collectives. Les figures 3.15 et 3.16. illustrées par Sayama (2015 ; 2016) proposent une représentation visuelle et synthétique des outils et méthodes issus de la science des systèmes complexes présentées ci-dessus. Organisées en sept grands domaines : les trois cercles situés à gauche : dynamique non linéaire, théorie des systèmes et théorie des jeux illustrent les outils et méthodes historiques. Par contre, les quatre cercles restants : formation des formes, évolution et adaptation, réseaux, et comportement collectif reflètent quant à eux les axes d'étude les plus récents dans ce champ.

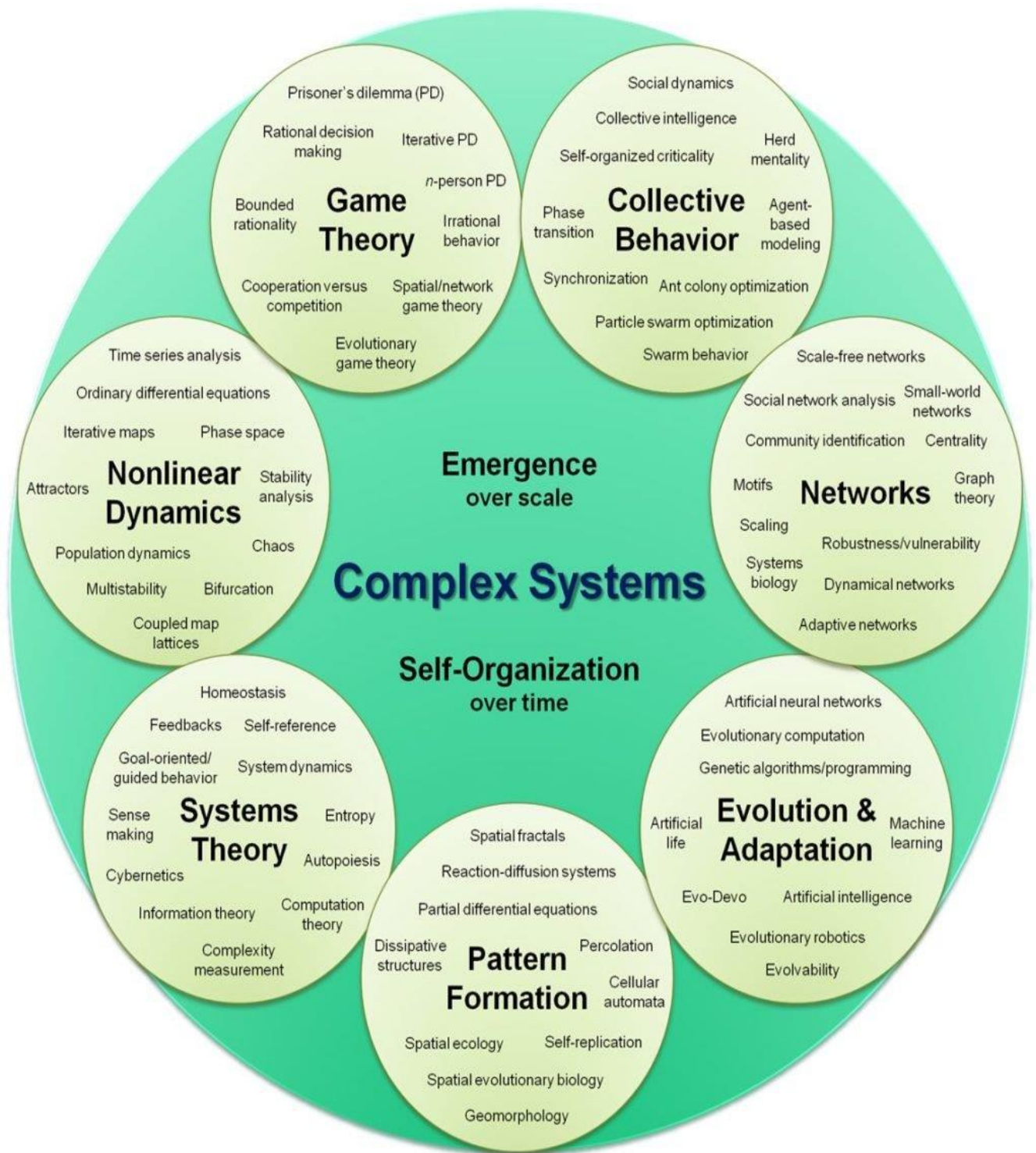


Figure 3.15. Carte visuelle et organisationnelle de la science des systèmes complexes, décomposée en sept domaines thématiques. Sayama (2015).

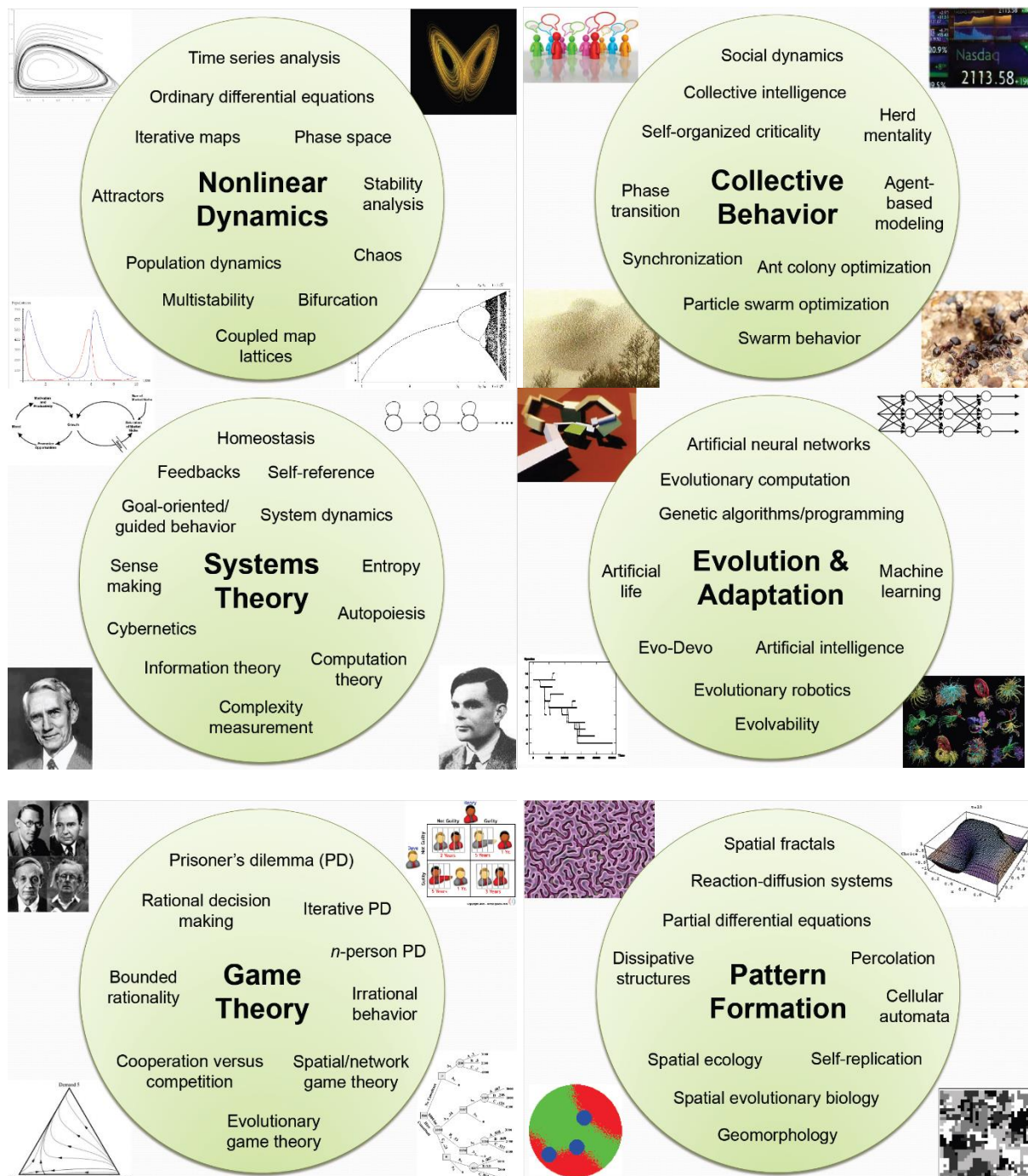


Figure 3.16. Carte visuelle synthétique des méthodes en science des systèmes complexes, décomposée en six domaines thématiques. Sayama (2015).

. Conclusion

Ce chapitre a présenté les fondements épistémologiques, théoriques, conceptuelles et historiques des théories de la complexité, inscrites dans un champ élargi, et situées au croisement d'approches inter/transdisciplinaires. En abandonnant les logiques déterministes et réductionnistes propres au rationalisme des sciences classiques, la pensée complexe marque un changement paradigmatique : elle offre une lecture plus subtile et dynamique des

phénomènes urbains, en mettant en lumière les processus d'émergence, d'auto-organisation, d'adaptation et d'interdépendance.

L'évolution historique de ces théories depuis la théorie générale des systèmes jusqu'à leurs applications à la ville (CTC), reflète un approfondissement dans la manière de penser les systèmes dynamiques, dont les systèmes urbains constituent un exemple représentatif. En transposant ces cadres conceptuels et épistémologiques à l'analyse de l'urbain, le chapitre a mis en lumière l'apport d'une lecture de la ville comme système complexe, caractérisée par la diversité de ses formes et l'interaction continue entre une multiplicité d'acteurs et de dynamiques multi-échelles.

Dans cette perspective, la morphogenèse urbaine apparaît non comme un phénomène planifié et déterminé, mais comme le produit émergent de processus locaux, imbriqués et évolutifs. Les outils issus des théories de la complexité qu'ils relèvent de la modélisation (automates cellulaires, modèles multi-agents, réseaux, fractales ...) ou de la conceptualisation offrent ainsi des cadres d'analyse pertinents pour saisir les dynamiques de formation, d'évolution et de transformation des formes urbaines.

Finalement, les théories de la complexité ne se limitent pas à une abstraction théorique, elles constituent un instrument analytique et pratique puissant pour décrypter les logiques profondes de la morphogenèse urbaine, qu'il s'agisse de contextes contemporains ou traditionnels. Cette mise en perspective jette les bases sur lesquelles s'appuieront les chapitres suivants, consacrés à la modélisation de la ville par les approches systémiques et les outils issus de la théorie des réseaux.

. Notes et références bibliographiques

Morin, E. (2005). *Introduction à la pensée complexe*. Paris : Points-Essais.

Rey, A. (Éd.). (2009). *Le Petit Robert de la langue française 2009* (édition revue et corrigée). Paris : Dictionnaires Le Robert.

Jeuge-Maynard, I. (Éd.). (2010). *Le Petit Larousse illustré 2010*. Paris : Larousse.

Dauphiné, A. (2003). *Les théories de la complexité chez les géographes*. Paris : Anthropos (Économica).

Miller, J. H. (2015). A crude look at the whole: The science of complex systems in business, life, and society [E-book]. Basic Books.

Holland, J. H. (2014). Complexity: A very short introduction [E-book edition]. Oxford University Press.

Morin, E. (1981). *La méthode. Tome 1 : La nature de la nature* (Points Essais, n° 123). Paris : Seuil.

Sengupta, U. (2017). Complexity science: The urban is a complex adaptive system [eBook]. In D. Iossifova, C. Doll, & A. Gasparatos (Eds.), *Defining the urban* (1st ed., p. 17). Routledge.

Balmaceda, B., et Fuentes, M. A. (2016). Cities and methods from complexity science. *Journal of Systems Science and Complexity*, 29(5), 1177–1186. <https://doi.org/10.1007/s11424-016-6084-2>.

Siegenfeld, A. F., et Bar-Yam, Y. (2020). *An introduction to complex systems science and its applications*. *Complexity*, 2020, Article 6105872. <https://doi.org/10.1155/2020/6105872>.

- Crawford, R. (2016). What can complexity theory tell us about urban planning? New Zealand Productivity Commission. (Research Note 2016/2). ISBN 978-0-478-44032-4.
- Partanen, J., et Wallin, S. (2018). *Bridging soft and hard – Towards a more coherent understanding of self-organisation within urban complexity research*. *Finnish Journal of Urban Studies*, 55(3), 1–12. <https://www.yss.fi/journal/bridging-soft-and-hard/>.
- Alhadeff-Jones, M. (2008). Three generations of complexity theories: Nuances and ambiguities. *Educational Philosophy and Theory*, 40(1), 66–82. <https://doi.org/10.1111/j.1469-5812.2007.00411.x>.
- Stephan, J. (2019). *Complexité urbaine : langage et outils, le cas de Horsch Beyrouth* [Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay ; École doctorale des Sciences et de Technologie (Beyrouth)]. HAL. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02451244>.
- Ferreira, P. (2001). *Tracing complexity theory* (Research Seminar in Engineering Systems, pp. 1–26). Massachusetts Institute of Technology. <http://web.mit.edu/esd.83/www/notebook/ESD83-Complexity.doc>.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour* [eBook]. Oxford University Press.
- Theise, N. D. (2023). *Notes on complexity: A scientific theory of connection, consciousness, and being* [eBook]. Spiegel & Grau.
- Sayama, H. (2015). *Introduction to the modeling and analysis of complex systems* [e-book]. Open SUNY Textbooks. Milne Library, State University of New York at Geneseo.
- Basili, L. L. (1998). The fractal geometry of urban organisation: Beyond the crisis of ‘spontaneous order’. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 267–295). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_8.
- Kallemeyn, L. M., Hall, J. N., & Gates, E. F. (2019). Exploring the relevance of complexity theory for mixed methods research. *Journal of Mixed Methods Research*, 14(3), 288–304. <https://doi.org/10.1177/1558689819872423>.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Champaign, IL: Wolfram Media.
- Bertalanffy, L. von. (1968). *General system theory: Foundations, development, applications*. New York: George Braziller Inc.
- West, G. (2017). *Scale: The universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies* [Ebook edition]. Penguin Press.
- Buš, P. (2015). *Emergence in urban environments: Agent-based simulation of environment reconfiguration* [Thèse de doctorat, Université technique tchèque de Prague, Faculté d’architecture, MOLAB 15116].
- Holland, J. H. (2023). *Emergence: From chaos to order* [eBook]. Oxford University Press.
- Johnson, S. B. (2001). *Emergence: The connected lives of ants, brains, cities, and software*. New York, NY: Scribner.
- Portugali, J. (2000). *Self-Organization and the City* [eBook edition]. Berlin: Springer-Verlag.
- Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude : Enjeux de connaissance pour le géographe et l’urbaniste* [Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d’Azur, Nice].
- Allen, P. M. (2005). *Cities and regions as self-organizing systems: Models of complexity* (eBook ed.). Taylor & Francis e-Library.

Park, J.-J. (2010). *Morphogenèse de la ville contemporaine : Essai sur la multi-échelle* (Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Laboratoire de systèmes d'informations géographiques). Lausanne, Suisse : École polytechnique fédérale de Lausanne.

Cambien, A. (2007). *Une introduction à l'approche systémique : Appréhender la complexité* [Rapport de recherche]. Lyon: Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU).

Castells, M. (2010). *The rise of the network society* (Vol. 1). Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.

Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423 ; 27(4), 623–656. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>.

Turing, A. M. (1936). *On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem*. *Proceedings of the London Mathematical Society*, s2-42(1), 230–265. <https://doi.org/10.1112/plms/s2-42.1.230>.

McCulloch, W. S., et Pitts, W. H. (1943). *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), 115–133. <https://doi.org/10.1007/BF02478259>.

Wiener, N. (2019). *Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine* [Open Access edition]. Cambridge, MA: MIT Press. (Œuvre originale publiée en 1948).

Prigogine, I., & Nicolis, G. (1967). On symmetry-breaking instabilities in dissipative systems. *The Journal of Chemical Physics*, 46(9), 3542–3550. <https://doi.org/10.1063/1.1841255>.

Thom, R. (1977). Structural stability, catastrophe theory, and applied mathematics: The John von Neumann Lecture, 1976. *SIAM Review*, 19(2), 189–201. <https://doi.org/10.1137/1019036>.

Maturana, H. R., & Varela, F. J. (1972). *Autopoiesis and cognition: The realization of the living*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.

Holland, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (2nd ed.). Cambridge, MA: MIT Press.

Kauffman, S. A. (1993). *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York: Oxford University Press.

Bak, P. (1996). *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Copernicus/Springer.

Morin, E. (1986). *La méthode 3 : La connaissance de la connaissance*. Paris: Le Seuil.

Batty, M. (2005). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.

Batty, M. (2013). *The new science of cities* [eBook edition]. Cambridge, MA: MIT Press.

O'Sullivan, D. B. (2000). *Graph-based cellular automaton models of urban spatial processes* [Thèse de doctorat, University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis].

O'Sullivan, D. (2004). Complexity science and human geography. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 29(3), 282–295. <https://doi.org/10.1111/j.0020-2754.2004.00321.x>.

Castellani, B., & Hafferty, F. W. (Eds.). (2009). *Sociology and Complexity Science: A New Field of Inquiry* (1re éd., Springer eBook). Springer.

Pumain, D. (1998). Urban research and complexity. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 323–337). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_10.

Wohl, S. (2020). *Complex adaptive systems & urban morphogenesis: Analyzing and designing urban fabric informed by CAS dynamics* [Thèse de doctorat, Université de Technologie de Delft]. TU Delft Open.

- Portugali, J. (2012). Complexity theories of cities: Achievements, criticism and potentials. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), *Complexity theories of cities have come of age* (pp. 47–62). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_4.
- Allen, P. M., et Sanglier, M. (1981). Urban evolution, self-organization, and decisionmaking. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 13(2), 167–183. <https://doi.org/10.1068/a130167>.
- Tobler, W. R. (1979). Cellular geography. In S. Gale & G. Olsson (Eds.), *Philosophy in geography* (Theory and Decision Library, Vol. 20, pp. 379–386). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-009-9394-5_18.
- Couclelis, H. (1985). Cellular worlds: A framework for modeling micro–macro dynamics. *Environment and Planning A*, 17(5), 585–596. <https://doi.org/10.1068/a170585>.
- White, R., & Engelen, G. (1993). Cellular automata and fractal urban form: A cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 25(8), 1175–1199. <https://doi.org/10.1068/a251175>.
- Batty, M., et Longley, P. (1994). *Fractal cities: A geometry of form and function* [eBook edition]. Academic Press.
- Frankhauser, P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Paris : Anthropos (collection « Villes »).
- Batty, M., & Marshall, S. (2012). The origins of complexity theory in cities and planning. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), *Complexity theories of cities have come of age* (pp. 21–45). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_3.
- Marshall, S. (2009). *Cities, design and evolution* (1re éd.) [eBook]. Routledge / Taylor & Francis.
- Portugali, J. (2006). *Complexity theory as a link between space and place*. *Environment and Planning A*, 38(4), 647–664. <https://doi.org/10.1068/a37260>.
- D’Acci, L. (2019). On urban morphology and mathematics. In L. D’Acci (Ed.), *The mathematics of urban morphology* (pp. 1–21). Birkhäuser. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12381-9_1.
- Batty, M. (2007). Model cities. *Town Planning Review*, 78(2), 125–151. <https://doi.org/10.3828/tpr.78.2.3>.
- Phelan, S. E. (2001). What is complexity science, really? *Emergence: A Journal of Complexity Issues in Organizations and Management*, 3(1), 120–136. https://doi.org/10.1207/S15327000EM0301_08.
- Sayama, H. (2016). Complex systems & network science: Background, state-of-the-art, future prospects, and applications to organizational science. 13th NetEco Symposium.

Chapitre 4 : ville islamique traditionnelle, mythes et vérités

« La médina est un modèle trop parfait pour qu'on puisse lui prêter une adéquation historique »
Jacques Berque

« Nul doute qu'il n'y ait, à travers l'Islam, de Gibraltar aux Isles de la Sonde, un type de ville islamique, et l'exemple, à lui seul, peut nous suffire comme image de ces rapports évidents entre villes et civilisations. »
Fernand Braudel

. Introduction

La ville islamique traditionnelle, à la croisée de l'histoire, du patrimoine et de l'urbanisme, constitue un modèle urbain authentique. Loin de se réduire à un simple agencement spatial, elle reflète l'interaction complexe entre besoins humains, normes religieuses, pratiques sociales et contraintes environnementales. Comprendre sa morphogenèse implique de dépasser les visions simplistes qui la réduisent à des motifs décoratifs ou à des ruelles labyrinthiques. Elle demeure ainsi un objet d'étude problématique, au centre de débats scientifiques. Son analyse, dans ses différentes dimensions, reste fondamentale pour en saisir la complexité. Paradoxalement, si elle est aujourd'hui valorisée comme symbole patrimonial, elle est en même temps fragilisée par un double processus. D'un côté, le départ progressif de ses habitants ; de l'autre, sous couvert de modernisation, des interventions urbaines et une spéculation immobilière qui détruisent et dénaturent ses composantes, malgré les efforts des instances de conservation, nationales et internationales.

Loin d'être figée, la morphologie de la ville islamique s'est construite au fil des siècles par un processus d'adaptation et de transformation, générant des formes urbaines reconnaissables mais diversifiées, en Andalousie, au Maghreb comme au Machrek. Cette dynamique évolutive invite à l'explorer comme le produit d'un processus morphogénétique. Celui-ci ne relève pas d'un plan directeur unique ni d'un modèle universel, mais d'une multitude de choix et d'actions locales qui, en s'accumulant, ont produit des formes urbaines à la fois cohérentes et adaptatives. Chaque quartier, chaque ruelle, chaque espace collectif répond à des besoins concrets : protection, intimité, sociabilité, commerce..., tout en s'inscrivant dans un cadre plus vaste de normes religieuses et de traditions sociales. C'est cette articulation entre spontanéité et régulation, entre émergence locale et cohérence globale, qui donne à la ville islamique traditionnelle sa singularité morphologique et en fait un objet pertinent pour l'étude des théories de la complexité.

Ce chapitre propose une lecture critique de la ville islamique traditionnelle à travers cinq axes complémentaires. D'abord, un aperçu de ses caractéristiques générales permettra d'en dégager les traits distinctifs. Ensuite, l'étude de sa genèse et de son évolution historique conduira à esquisser une typologie des formes urbaines. La discussion des paradigmes qui ont tenté de l'expliquer mettra en évidence la diversité et les limites des approches et méthodes les plus influentes. L'analyse des mécanismes producteurs de la ville islamique révélera les logiques qui en façonnent la morphologie. Enfin, une ouverture vers l'interprétation de la ville islamique comme système complexe offrira un cadre théorique en dialogue avec les apports des théories de la complexité développés dans les chapitres précédents, posant ainsi les bases de la modélisation de la morphogenèse urbaine qui sera développée par la suite.

1. La ville islamique traditionnelle : terminologie et caractéristiques

La littérature scientifique consacrée aux ensembles urbains dans les contextes islamiques a longtemps été marquée par une terminologie qui balançait entre « ville islamique », « ville

arabe » et « ville des musulmans ». Loin d'être neutres, ces termes, malgré leur apparence de concepts objectifs, sont en réalité chargés d'une dimension subjective liée aux traditions académiques et aux contextes historiques spécifiques. Cette hétérogénéité soulève une problématique plus profonde, comme l'a souligné Akbar (1994) : existe-t-il réellement une ville islamique ? De quoi s'agit-il ? Il apparaît donc nécessaire, pour cerner ces questionnements et déconstruire la terminologie des ensembles urbains traditionnels islamiques, de commencer par la définition linguistique, puis de passer aux descriptions des composantes morphologiques, conjointement avec l'organisation spatiale et structurelle.

Les lexiques et dictionnaires de la langue française qualifient généralement la ville traditionnelle dans les pays musulmans de « *médina* ». Selon Le Petit Larousse, le terme médina est le nom féminin de l'arabe « *madina* » désignant dans les pays arabes, la vieille ville par opposition aux quartiers neufs (Jeuge-Maynard, 2010). Parallèlement, Le Petit Robert définit la médina comme la partie ancienne d'une ville d'Afrique du Nord (Rey, 2009). De même Lévy et Lussault (2013) définissent médina comme la partie ancienne d'une ville, traditionnellement entourée de remparts, et caractérisée par une forte densité bâtie, des « *souks* » et une mixité des fonctions résidentielle, économique, sociale et culturelle. Ce terme est très utilisé dans les pays du Maghreb, mais également au Machrek, en Espagne, en Méditerranée ou à Malte. De leur côté, Merlin et Choay (1996, p. 562-563) soulignent que le terme médina était adopté par les occidentaux pour désigner les villes arabes anciennes et la spécificité de leur structure spatiale. Celle-ci est apparue longtemps indéchiffrable et labyrinthique aux étrangers, des premiers voyageurs jusqu'à nos jours. Mais la médina est récemment devenue un objet de fascination pour nombre d'architectes et d'urbanistes occidentaux, qui déçus par le simplisme de l'urbanisme progressiste, virent en elle un symbole de l'urbain dont ils tentent d'imiter la compacité du tissu. La ville arabe traditionnelle reflète spatialement sa structure sociale : elle organise les groupes humains selon des codes culturels tout en respectant la loi islamique, qui transcende ces cloisonnements et assure l'unité de l'ensemble urbain.

Les instances de protection et de valorisation du patrimoine, à l'image de l'UNESCO, mettent en avant la nécessité de préserver et de réhabiliter des centres urbains, en développant des cadres généraux de compréhension plutôt qu'imposer des définitions strictes de la ville islamique. De ce fait, ces villes, conçues en fonction du climat, du terrain et des traditions religieuses et culturelles, se distinguent par des formes adaptées, comme la maison à cour centrale, qui favorise le confort climatique, l'optimisation spatiale et la cohésion communautaire, ainsi que par une architecture riche en symboles. Des exemples emblématiques tels que Fès, Alger, Tunis, Le Caire ou Istanbul illustrent l'urgence de cette approche : ces villes ne doivent pas être réduites à des musées à ciel ouvert, mais reconnues comme des entités vivantes où patrimoine matériel et identité sociale demeurent indissociables (Antonioni, 1983, p. 23-96). Dans une perspective complémentaire, l'ICCROM n'apporte pas aussi une définition normative, mais la conçoit comme une réalité urbaine façonnée par des traditions sociales, religieuses et culturelles propres à la civilisation islamique. Ces villes doivent être comprises comme des organismes vivants et complexes, porteurs de multiples strates historiques et de significations symboliques. Leur développement s'explique par des facteurs locaux : climat, pratiques religieuses, institutions comme le « *Waqf* », qui ont façonné des formes urbaines et architecturales spécifiques, ce qui implique d'éviter l'application de modèles universels de conservation (Mahdy, 2017, p. 4-26).

Cette terminologie fournit un cadre introductif, mais elle ne permet pas de saisir toute la complexité de la ville islamique. Par conséquent, il est nécessaire d'examiner ses

principales composantes : l'unité résidentielle, qui organise la vie domestique ; la mosquée et les équipements collectifs, pivots de la vie religieuse et sociale ; les structures commerciales et économiques, moteur de l'activité urbaine ; et enfin, l'organisation spatiale et structurelle, qui articule et relie l'ensemble. Cette analyse offrira une première lecture de la forme urbaine, tout en laissant ouvertes les dimensions plus profondes, qui seront abordées dans les sections suivantes.

1.1. L'unité résidentielle

Selon Bianca (2000, p. 73-101), l'unité résidentielle est la cellule fondamentale de la ville islamique. Plus qu'un simple édifice, la maison constitue le point d'articulation entre le foyer familial, la ruelle et le quartier, jusqu'à l'ensemble de la ville. Elle n'existe jamais comme objet isolé mais comme composante d'un tissu organique : en s'agrégeant les unes aux autres, ces maisons façonnent des ensembles homogènes et continus. Le modèle dominant est la maison à cour, répandue du Maghreb au Golfe, qui concentre la vie domestique autour d'un espace intérieur protégé. De même, Petruccioli (2008) théorise cette maison à cour « *Dar* » comme cellule morphogénétique du tissu urbain islamique. Dans la même perspective, Berardi (2008) confirme que l'agrégation des maisons comme cellules façonne le tissu urbain. Il qualifie la cour « *Wast ad-dâr* » de cœur de la maison, où se rassemblent la famille élargie et où convergent les circulations internes, tandis que les pièces « *Baits* » s'organisent autour d'elle pour préserver l'intimité. À l'échelle urbaine, la médina est composée de modules quadrangulaires ouverts au ciel, et dont la hiérarchie des voies principales / secondaires et des impasses sert de ceinture protectrice à des agrégats résidentiels familiaux.

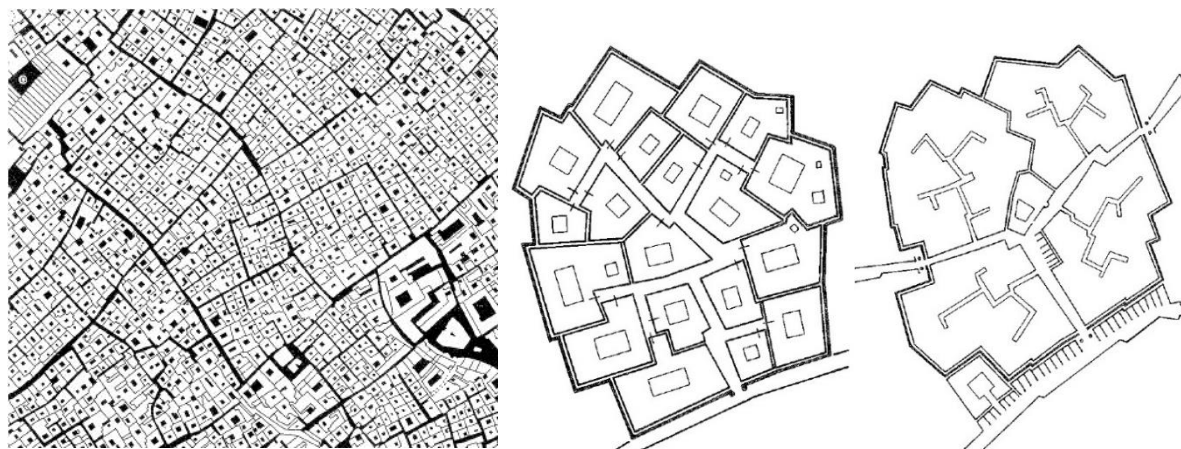


Figure 4.1. Différentes couches structurelles dans la ville islamique au Maghreb. Source : Bianca (2000).

L'organisation de cette unité morphologique obéit avant tout à une logique d'intimité « *Hourma* ». Elle est conçue comme un espace introverti : les façades donnant sur la rue sont presque aveugles, tandis que la cour devient le centre vital. L'accès depuis l'espace public se fait par une série de transitions : le seuil et le vestibule cassent la ligne de vue, avant de déboucher sur la cour puis sur les pièces plus profondes réservées à la famille. Les circulations internes reflètent ce gradient de confidentialité, renforcé par la disposition de pièces spécialisées pour la réception « *Majlis*, *Qa'aa* » à proximité de l'entrée, afin de séparer visiteurs et espace intime (Bianca, 2000, p. 73-101). Les dimensions sociales et juridiques sont essentielles. Les règles de « *Fiqh* », de « *Hisba* », et d'usage coutumier « *Ourf* » fixent des normes de voisinage : vis-à-vis à respecter, limites d'encorbellement, hauteurs autorisées, ou encore gestion des eaux de pluie. Ces régulations protègent les droits de chacun à l'air, à la

lumière et à l'intimité (Hakim, 1994). De même, l'espace de la ruelle « *Derb, Zanja, Sikka* » est souvent géré collectivement, avec des portes ou dispositifs de contrôle social, renforçant l'idée d'un espace semi-public, partagé par un petit groupe de familles (Al-Hathloul, 1981, p. 135-161).

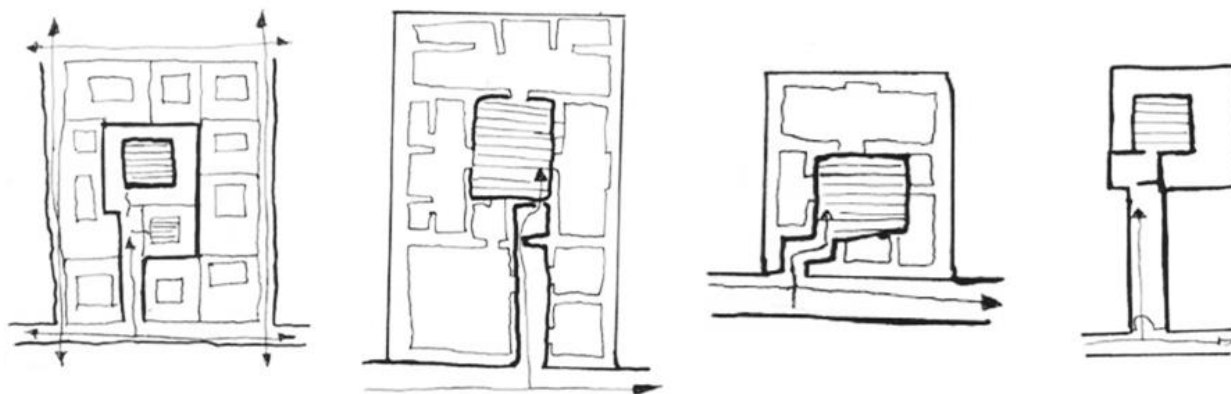


Figure 4.2. Hiérarchie et discrétion dans l'accès à l'habitation. Source : Berardi (1970).

La forme de la maison répond également aux conditions climatiques. La cour joue un rôle essentiel de régulation thermique et lumineuse grâce à l'ombrage, à l'évaporation et au rayonnement nocturne, constituant ainsi un dispositif de refroidissement passif. En journée, les murs épais en pisé ou en pierre, dotés d'une forte inertie thermique, absorbent lentement la chaleur. La nuit, lorsque l'air extérieur se rafraîchit, ils restituent progressivement cette chaleur par rayonnement, se préparant ainsi à emmagasiner de nouveau la chaleur du lendemain. L'évaporation de l'eau issue d'une fontaine ou de la végétation contribue également à abaisser la température de l'air, plus dense, qui descend dans la cour et pénètre dans les pièces voisines par de larges ouvertures. L'organisation spatiale reflète aussi une adaptation saisonnière : certaines pièces sont orientées et utilisées pour l'été, d'autres pour l'hiver. Les murs, les toits-terrasses, les ouvertures restreintes sur la rue et les larges baies tournées vers la cour favorisent un confort thermique adaptatif. Dans le Golfe, les tours à vent ajoutent un dispositif d'aération ingénieux, tandis que les moucharabiehs en bois filtrent la lumière et protègent l'intimité en contrôlant le regard (Raydan et al., 2004). La maison traditionnelle se caractérise en outre par sa polyvalence. Les pièces, non spécialisées, s'adaptent aux besoins quotidiens : elles peuvent tour à tour servir à dormir, manger ou travailler. Le cycle de vie familial s'inscrit dans une croissance progressive de l'habitat, qui s'étend verticalement ou horizontalement selon les moyens disponibles. Cet aspect incrémental illustre la capacité d'adaptation et de transformation continue du tissu résidentiel. Il renvoie directement au principe de croissance progressive : la maison n'est pas conçue comme un produit fini, mais comme une entité organique, capable de s'agrandir au rythme des besoins familiaux, que ce soit par l'ajout de nouvelles pièces ou de niveaux. Ce modèle offre une flexibilité qui permet à l'habitat de s'ajuster aux différentes étapes de la vie domestique. L'accueil de nouveaux couples mariés dans la même famille est un exemple courant, constituant ainsi une solution résidentielle plus durable et adaptable. (Sibley, 2004).

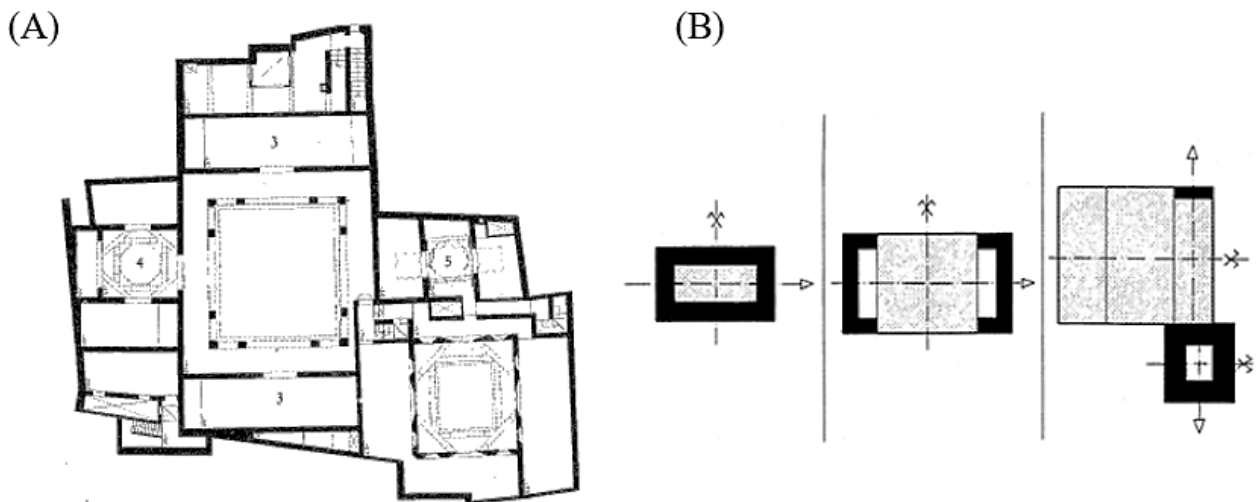


Figure 4.3. Forme et organisation spatiale de l'habitation traditionnelle : (A) plan d'une maison à Fès ; Schéma d'extension hypothétique de la maison. Source : Sibley (2004).

Sur le plan typologique, Petruccioli (2004) confirme que si les principes sont communs, chaque région développe ses variantes. Au Maghreb, la maison « *Dar, Ryad* » se caractérise par une cour quadrangulaire parfois jardinée, un vestibule en chicane et des toits-terrasses largement utilisés. Au Caire, à Alep ou à Damas, le plan introduit la « *Qa'aa* » ou l'« *Iwan* », espaces de réception à l'architecture élaborée, ainsi que des moucharabiehs décoratifs. Dans la péninsule arabique, les maisons à cour « *Hosh* » s'articulent avec des ruelles étroites « *Sikka* », et les matériaux varient entre adobe, pierre ou palmes selon le contexte. En Turquie, la maison à cour intègre un plan plus complexe. Elle dispose d'une cour de service et d'un jardin avant, avec des pièces qui s'articulent autour d'une pièce centrale polyvalente. Malgré cette diversité, on retrouve partout les invariants : la centralité de la cour, l'introversion et la recherche d'un équilibre entre intimité et sociabilité. Cependant, Raymond (1985, p. 273- 326) analyse l'habitat selon des plans socio-économiques et géographique, avec une remise en question du modèle unique de la maison dans la ville islamique. Ains, le type d'habitation et sa proximité au centre reflétait également le statut social et la richesse des habitants. L'espace urbain arabe selon Raymond s'organisait selon une logique hiérarchisée. Le centre, construit autour de la grande mosquée et des marchés, concentrait les élites : bourgeoisie commerçante, oulémas et membres du pouvoir. Les artisans et commerçants habitaient quant à eux à proximité immédiate de leur lieu de travail, souvent à quelques centaines de mètres seulement. Les périphéries accueillaient la population la plus pauvre, contrainte d'habiter dans des zones moins attractives et exposées aux nuisances des ateliers artisanaux polluants ou bruyants. Il distingue trois grands types :

- Logements de riches, étaient souvent grandes, bien construites, et entretenues en continu pendant des siècles. Elles comportaient généralement une cour centrale, des salons de réception, des chambres privées, des bains et des jardins.
- Logements de la classe moyenne, elles étaient plus simples et moins artistiquement décorées. Certaines pouvaient ne pas avoir de cour intérieure et être de plain-pied, avec un petit jardin intérieur. Ces maisons étaient conçues pour la vie de famille et les activités domestiques.

- Logements Collectifs, une partie importante de la population, en particulier les résidents temporaires comme les voyageurs, les marchands, les étudiants et les militaires non logés en caserne, vivait dans des logements collectifs. Ces structures, telles que les caravansérails « *Funduq, Wakala, Khan* », étaient des sortes d'hôtels urbains. Ils étaient souvent regroupés dans des quartiers spécialisés et offraient un hébergement, des entrepôts pour les marchandises et des écuries. Il existait également des résidences collectives moins formelles pour les pauvres.

1.2. La mosquée et les différents équipements

Mortada (2003, p.85-93) souligne que la mosquée est l'élément fondamental de l'environnement urbain islamique. L'objectif de la mosquée est de favoriser l'harmonie entre le croyant et dieu, tout en renforçant la cohésion communautaire. Les sources islamiques primaires, le Coran et la tradition prophétique « *Sounnah* », définissent la mosquée comme un lieu de culte exclusif à « *Allah* », dédié à la prière et à la prosternation. Pour renforcer son rôle central, le Prophète a insisté sur son emplacement à une courte distance de marche (150-200 mètres) des habitations, ce qui se reflétait dans l'urbanisation traditionnelle de Médine. Plus qu'un simple lieu de culte, elle est le véritable cœur de l'espace urbain, à la fois religieux, social, éducatif et politique. La grande mosquée du vendredi « *jamii* » concentre les fonctions les plus importantes : prêche hebdomadaire, diffusion des messages officiels et affirmation de l'autorité politique et spirituelle. À ses côtés, une multitude de mosquées de quartier « *masjid* », plus modestes et intégrées dans le tissu résidentiel, assurent la prière quotidienne et renforcent la cohésion de la communauté locale. Cette hiérarchie spatiale et fonctionnelle reflète l'organisation de la médina, où la centralité va de l'échelle de la ville à celle du quartier et du voisinage.

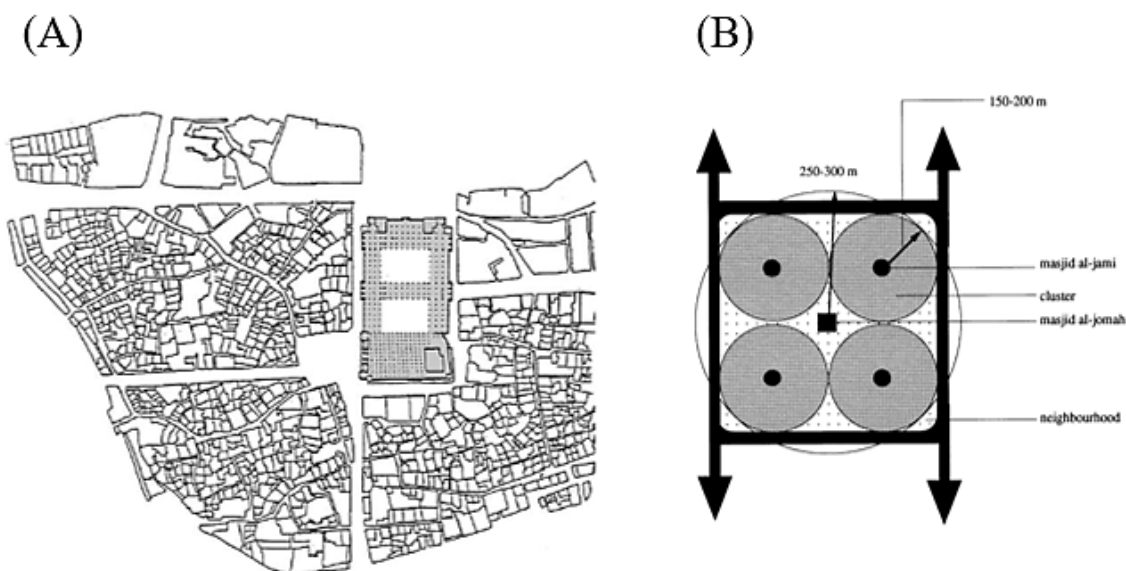


Figure 4.4. Centralité de la mosquée dans la ville islamique : (A) Mosquée du prophète à Médine ; (B) Schéma de cette centralité au niveau des quartiers. Source : Mortada (2003).

De son côté, Denoix (2008) confirme que dès les premières fondations musulmanes, la mosquée centrale du vendredi est conçue comme le pivot autour duquel se structure l'espace urbain. Les villes fondées par les musulmans « *Amsar* » comme Koufa et Basra ont été organisées à partir de la mosquée, qui servait à la fois de lieu de prière, de siège du gouverneur,

de tribunal et de centre militaire. Elle n'était pas un monument isolé mais un espace multifonctionnel où s'exerçait l'autorité religieuse et politique. À Fostat, la mosquée centrale fut le seul bâtiment monumental dans une ville composée de constructions modestes, affirmant ainsi son rôle structurant. Selon Von Grunebaum (1955), la grande mosquée du vendredi « *Al-jamii* » constitue le véritable cœur de la ville musulmane. Dans les médinas du Maghreb et du Moyen-Orient, elle est presque toujours placée en relation immédiate avec le souk principal, formant un binôme sacré/profane qui articule religion et commerce. Les marchés rayonnent à partir d'elle et les principales ruelles y convergent, faisant de la mosquée un organisateur spatial et fonctionnel de la cité, et le pivot central de la structure urbaine.

Conjointement, en plus des marchés autour de la mosquée centrale, gravitent divers équipements collectifs. Les madrasas, institutions éducatives et juridiques, contribuaient à la formation des élites religieuses et administratives ; les bibliothèques rattachées aux mosquées entretenaient la transmission du savoir ; les « *Bimaristans* » (hôpitaux) offraient des services médicaux, tandis que les fontaines, les hammams ou encore les caravansérails complétaient les besoins du quotidien. Ce réseau d'équipements illustre le caractère global de la mosquée, qui dépasse largement la sphère religieuse pour embrasser les différentes dimensions de la vie urbaine (Bianca, 2000, p. 101-123). Le système « *Waqf, Habous* », qui est un système de fondation pieuse permettait de financer la construction et l'entretien des mosquées et des infrastructures publiques. Par ce mécanisme, la mosquée devient un acteur économique majeur, garantissant la redistribution des richesses et la continuité des services collectifs. Ainsi, l'économie religieuse et la morphologie urbaine s'entrelacent dans un système cohérent et intégré. La mosquée est insérée dans la trame du quotidien, dépassant sa fonction de prière pour devenir un lieu de redistribution et d'assistance. Dans différentes villes, les revenus des Waqfs servaient à subventionner des marchés et à payer les enseignants des écoles coraniques annexées (Raymond, 1985, p.221-227 ; Hakim, 2008).

1.3. Structures commerciales et de production économique

Raymond (1985, p.228-271) rappelle que le souk n'est pas seulement un espace marchand, mais le véritable cœur de la ville traditionnelle islamique. Dans la médina islamique, il constitue une colonne vertébrale urbaine. Il se déploie généralement le long d'un axe principal reliant la porte de la ville à la grande mosquée du vendredi. Cet axe, souvent couvert ou bordé de portiques, concentre l'activité économique mais aussi le flux des habitants, des pèlerins et des étrangers. Il s'agit donc d'une voie de communication majeure qui articule la ville, de son entrée extérieure jusqu'à son centre sacré et politique. L'organisation du souk est hiérarchisée : les commerces les plus prestigieux et les produits de luxe (bijoux, livres, étoffes fines) se trouvent près de la mosquée du vendredi. Plus on s'éloigne, plus on rencontre des marchés spécialisés dans les produits ordinaires (alimentation, artisanats), puis des espaces liés à l'approvisionnement (marchés aux grains, aux animaux) souvent situés près des portes. Ce modèle illustre une logique spatiale fonctionnelle qui articule étroitement la structure urbaine et la hiérarchie économique. Raymond insiste sur le fait que la ville islamique traditionnelle n'était pas seulement un espace de consommation, mais aussi un centre de production artisanale. Le textile, le cuir, la métallurgie, la céramique faisaient l'objet d'une activité dense et organisée. Ces productions étaient encadrées par des corporations, chargées de réglementer la qualité, de fixer les prix et d'organiser la transmission des savoir-faire. Loin d'être une structure anarchique, le marché jouait un rôle d'ajustement aux besoins économiques et sociaux. Il garantissait aussi un certain équilibre entre producteurs, marchands et consommateurs.

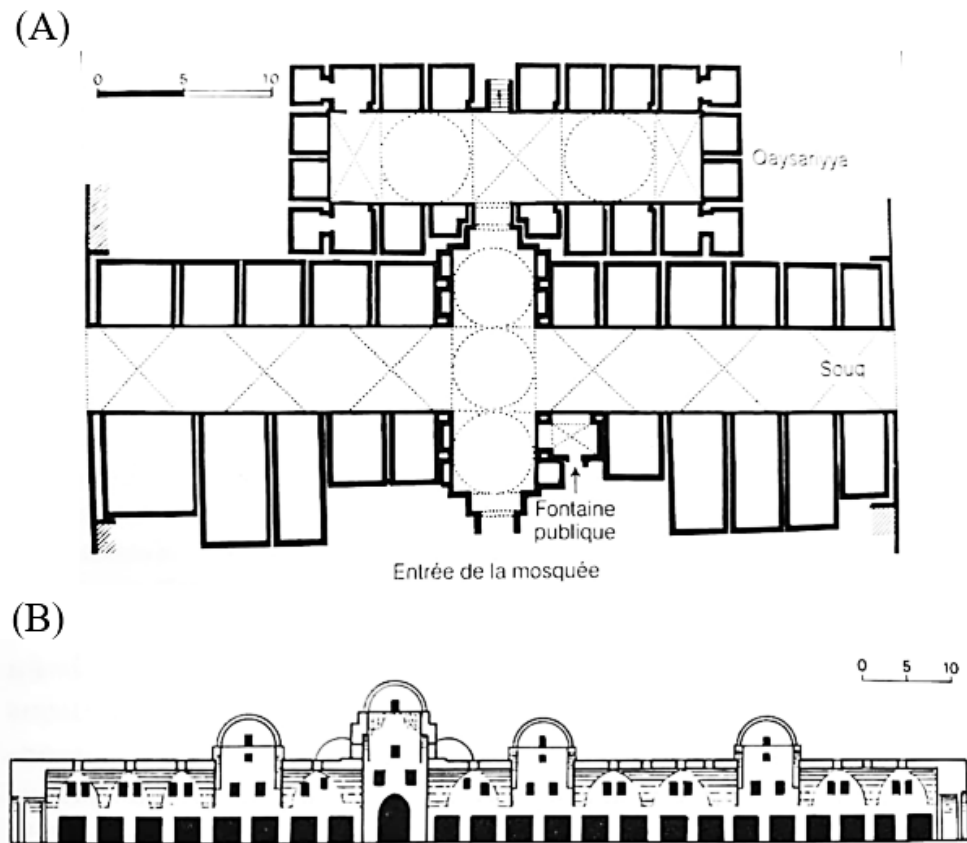


Figure 4.5. Structures commerciales en médina : (A) Plan du souk de Barham Pacha à Alep ; (B) coupe de khan Ed Diwan à Alep. Source : Raymond (1985).

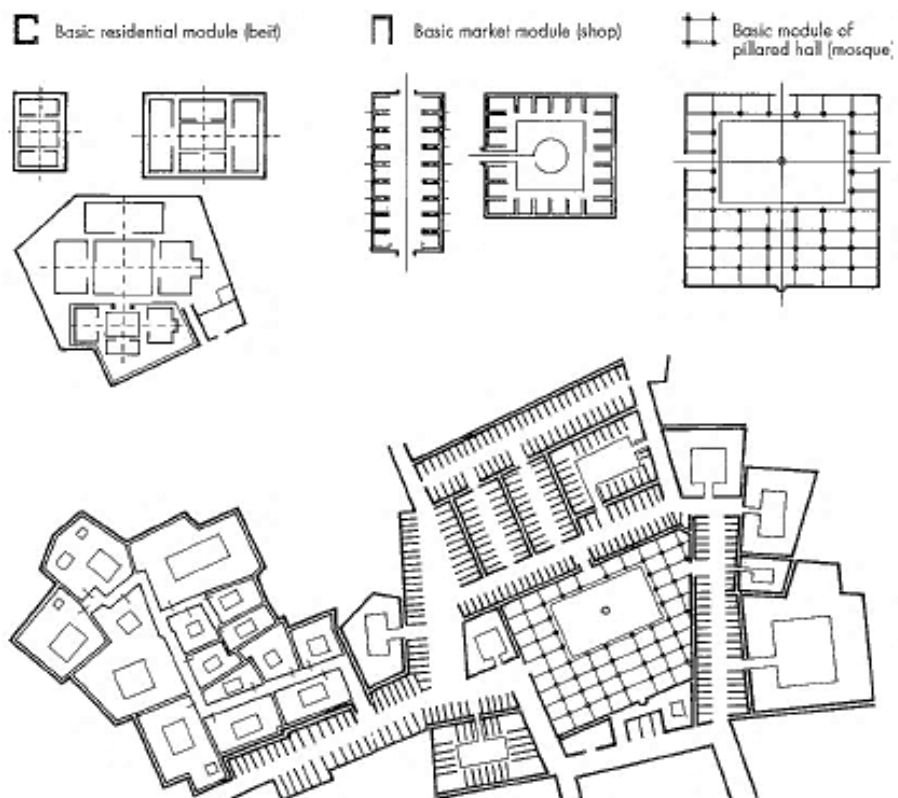


Figure 4.6. Typologie de marché et articulation avec la ville dans la médina de Fès. Source : Bianca (2000).

Sur le plan architectural et urbain, urbaine Al-Hathloul (1981, p. 65-85) insiste sur le fait que le souk n'était pas seulement une rue commerçante : il s'agissait souvent d'un espace couvert « *Qaysariyya, Bazar* », adapté au climat et favorisant la densité des échanges. Ces galeries marchandes formaient un tissu compact, générant des zones ombragées et protégées du soleil, ce qui renforçait la fonction de centralité. En cela, le souk contribuait directement à la morphologie compacte de la ville islamique, caractérisée par des rues étroites et un bâti dense. Simultanément, il met en évidence le rôle du droit islamique et des institutions dans l'organisation du commerce. Le marché était surveillé par le « *muhtasib* » (inspecteur des marchés) chargé de contrôler les prix, la qualité des produits et le respect des règles de la « *shari'aa* ». Cette régulation avait des effets urbains directs : elle fixait les lieux des activités autorisées, prévenait les nuisances (fumées, bruits, odeurs) et contribuait à une répartition harmonieuse entre zones résidentielles et zones artisanales ou commerciales. Ainsi, le souk n'était pas seulement une place d'échange économique, mais un espace façonné par des conventions sociales et juridiques qui maintenaient un équilibre entre les besoins économiques et la qualité de vie urbaine.

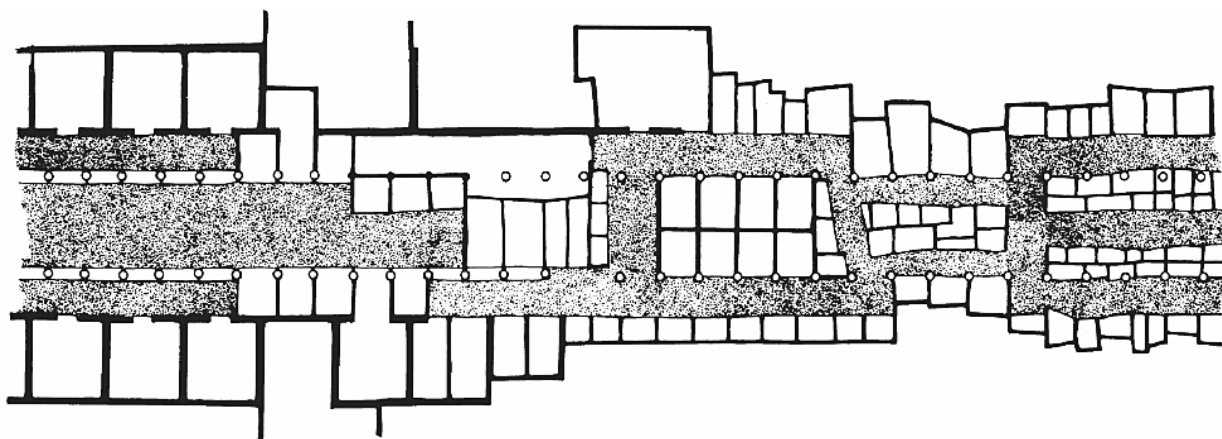


Figure 4.7. Transformation du réseau viaire quadrillé gréco-romain en souk islamique selon Sauvaget. Source : Al-Hathloul (1981).

1.4. Organisation spatiale et structurelle

La structure urbaine des villes islamiques se caractérise par une organisation organique, évoluant selon les besoins sociaux, religieux et économiques. La mosquée constitue le noyau fondateur, autour duquel s'articulent le souk, les institutions religieuses (madrassas, zawiya) et les équipements publics (hammams, fontaines). Les quartiers résidentiels, se développent de manière compacte, souvent en fonction des affiliations tribales, ethniques ou familiales. Cette compacité répond à des contraintes climatiques (recherche d'ombre, minimisation des déplacements) et sociales (intimité, sécurité). Ainsi, la ville traditionnelle obéit à une logique d'adaptation progressive, où chaque espace trouve sa place en fonction de son rôle dans la société (Mortada, 2003, p.58-86). Dans une perspective complémentaire, Raymond (1985 ; 2008), en analysant les grandes villes islamiques qu'il qualifie d'« arabes » à l'époque ottomane, souligne que leur organisation spatiale constitue un trait distinctif de la ville islamique, fondé sur des principes structurants propres :

- Centralité et centre structurant, la ville islamique traditionnelle s'organise autour d'un noyau indissociable : la grande mosquée du vendredi et le souk principal. Cette association n'est pas fortuite, car elle combine les deux pôles essentiels de la vie urbaine : le religieux et l'économique. La grande mosquée n'est pas seulement un lieu

de prière, mais aussi de justice, de rassemblement et de légitimation politique. Autour d'elle se déploie le souk, organisé en secteurs spécialisés où se concentrent les activités commerciales les plus prestigieuses (bijoux, textiles, livres). Cette articulation mosquée-souk joue ainsi le rôle de colonne vertébrale spatiale, reliant symboliquement et physiquement l'ensemble de la ville. Loin d'être chaotique, cette centralité traduit une logique urbaine claire : au cœur de la ville se rencontrent le sacré, l'économique et le politique.

- La distribution fonctionnelle des activités, l'organisation spatiale ne se limite pas à une logique religieuse ou communautaire ; elle obéit aussi à une rationalité économique et fonctionnelle. Les activités les plus prestigieuses, propres ou silencieuses, sont installées près du centre : librairies, bijouteries, textiles de luxe. En revanche, les métiers bruyants ou polluants (tanneries, poteries, abattoirs) se trouvent en marge de la ville, souvent près des cours d'eau ou des portes pour faciliter l'évacuation des déchets. Entre ces deux extrêmes, les « *khans* » et « *Fondouks* » assurent la jonction entre commerce de gros, caravaniers et commerce local. Cette répartition démontre une logique urbaine rationnelle, attentive à la fois à l'économie, à l'hygiène et au confort des habitants.
- La différenciation privé/public et séparation fonctionnelle, l'espace urbain islamique est marqué par une forte distinction entre la sphère publique et la sphère privée et par la séparation entre zones résidentielles et espaces commerciaux. Le centre représente la zone d'équipement, par contre les quartiers résidentiels se déploient en retrait de ce noyau. Les rues principales, marchés, mosquées et lieux de passage relèvent de l'usage collectif public et sont soumis à une gestion communautaire, tandis que les ruelles secondaires et impasses desservent exclusivement les habitations, limitant l'accès aux seuls résidents. Cette organisation traduit la recherche d'intimité et la protection du domaine privé, matérialisée par des dispositifs architecturaux comme les portes propres à chaque quartier.
- Les quartiers comme unités socio-spatiales, les quartiers « *Hara*, *Houma* » fonctionnent comme cellules socio-spatiales souples : agrégats de parenté, métiers, appartenances confessionnelles ou d'origine, dotés d'équipements de proximité (mosquées, hammams, fontaines, petites écoles coraniques) et d'un contrôle communautaire diffus. Il n'y a pas de barrière stricte entre eux, elles s'adaptent et se transforment ; ils ne sont ni des ghettos juridiques ni de simples unités morphologiques, mais des scènes de sociabilité et d'autorégulation urbaine.
- Le réseau viaire, l'un des traits les plus marquants de l'organisation spatiale est la gradation hiérarchique du réseau viaire. Les grandes artères relient les portes de la médina au noyau mosquée-souk et supportent les flux majeurs, marchands et processionnels. Autour d'elles s'organisent des rues secondaires qui desservent des marchés spécialisés et des ateliers. Enfin, le tissu résidentiel est marqué par des impasses « *Derbs*, *Sikkas* », qui protègent l'intimité domestique et réduisent la circulation aux seuls habitants. Ces rues étroites et sinueuses ne sont pas le fruit du hasard, mais d'une logique sociale, juridique, défensive et climatique. Cette hiérarchie reflète une rationalité d'usage : les voies publiques sont perméables et ouvertes, alors que les voies résidentielles sont fermées et contrôlées. Ce système, loin de traduire un « désordre oriental », comme l'ont souvent avancé les orientalistes, constitue une

véritable stratégie urbaine visant à articuler flux économiques, besoins résidentiels et sécurité sociale.

- Rôles des institutions urbaines, deux instruments façonnent matériellement cette organisation. D'une part, le waqf qui finance et stabilise dans la durée mosquées, médersas, fontaines, bains, souks et caravansérails ; grâce aux donations, il assure la durabilité des infrastructures urbaines, assurant l'entretien et la reproductibilité des services urbains. D'autre part, la *Hisba* (contrôle et régulation des alignements, encorbellements, saillies) arbitre les conflits d'usage du sol et de la rue, encadre les empiètements commerciaux et préserve les gabarits utiles à la circulation. Ensemble, ces dispositifs donnent à la ville sa robustesse morphologique et sa capacité d'adaptation.

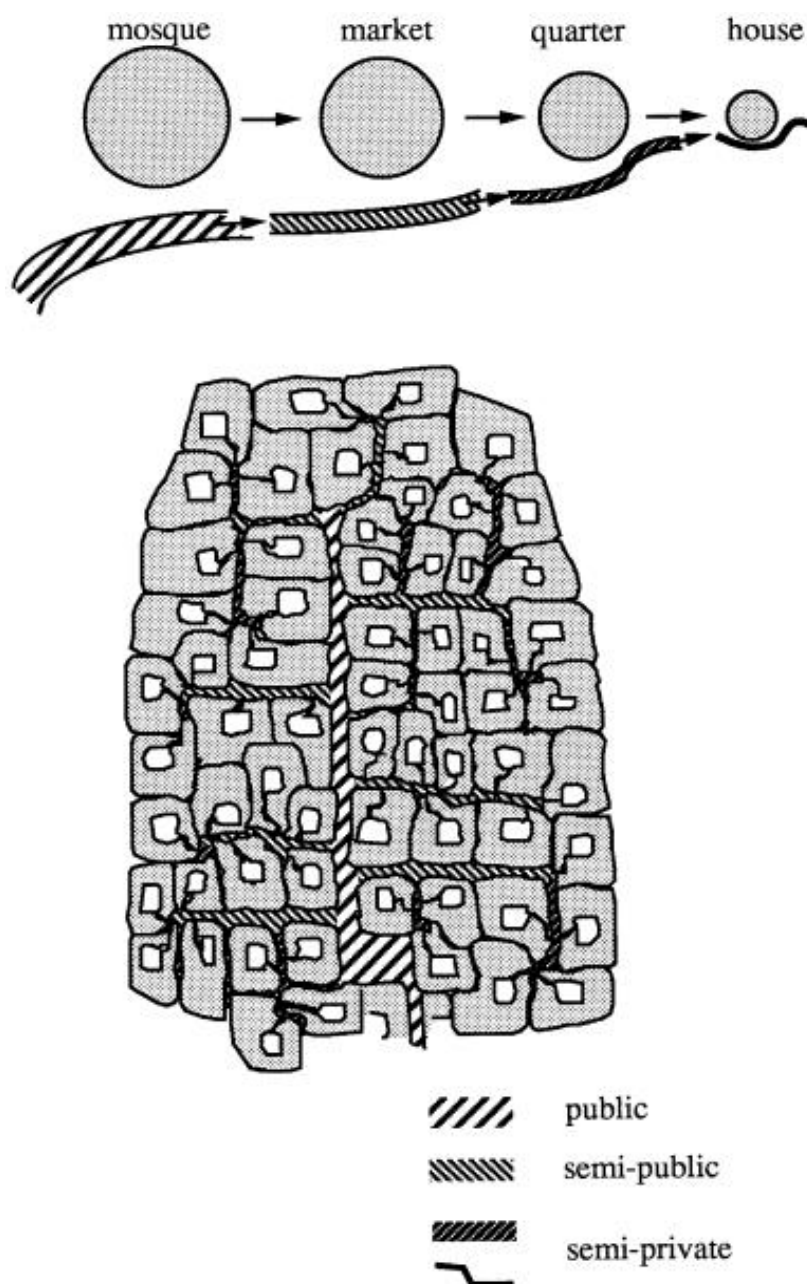


Figure 4.8. Schéma résumant caractéristiques et organisation d'un fragment de médina. Source : Mortada (2003).

L'analyse de ces caractéristiques montre que la ville islamique n'est pas un modèle immobile ou chaotique. Elle constitue au contraire un système cohérent et organique, et une réalité urbaine adaptable, capable d'intégrer des variations locales, climatiques et culturelles, tout en conservant des invariants structurants. La maison à cour illustre l'importance de l'intimité et de la vie familiale, le souk incarne le dynamisme économique régulé, tandis que la mosquée agit comme pivot spirituel et social unifiant l'ensemble. La hiérarchie spatiale, le réseau viaire sinueux et la distinction entre espaces privés et publics ne sont pas des anomalies, mais des réponses rationnelles et intelligentes aux besoins de la communauté. L'étude de ces structures, de l'unité résidentielle au réseau viaire, permet ainsi de dépasser la simple terminologie pour saisir la logique interne de la ville. Il convient désormais de compléter cette lecture morphologique et fonctionnelle par une perspective historique. Cela suppose d'examiner les conditions d'apparition des premières fondations musulmanes, puis les transformations opérées au fil des dynasties, des influences régionales et des contacts inter civilisationnels. Une telle approche permettra de dégager une typologie différenciée des villes islamiques, entre modèles fondateurs et adaptations locales.

2. Origine et évolution historique, vers une typologie

Après avoir mis en évidence les principales caractéristiques morphologiques et fonctionnelles de la ville islamique, il convient désormais de replacer ces structures dans une perspective historique, afin d'en dégager une lecture typologique. La ville islamique n'est pas née d'un seul bloc : elle s'est progressivement constituée à partir des premières fondations musulmanes du VII^e siècle, en interaction avec les héritages urbains antérieurs, les dynamiques politiques et les contextes géographiques variés. De l'archétype fondateur, Médine du Prophète, jusqu'aux grandes capitales califales, l'histoire urbaine islamique témoigne de processus d'adaptation et de transformation constants. Les influences byzantines, perses, berbères ou ottomanes ont contribué à diversifier les formes urbaines, tout en maintenant des invariants morphologiques et fonctionnels. Nous défendons l'idée que l'étude des origines historiques permet de construire une typologie nuancée de la ville islamique, en dépassant la dichotomie réductrice opposant villes planifiées et villes spontanées. Dans cette optique, nous proposons de distinguer deux grandes catégories : d'une part, les villes fondées par les musulmans, sous différentes variantes, qui traduisent des initiatives de création urbaine liées à l'expansion de l'islam et aux besoins politico-militaires, religieux, politiques et économiques ; d'autre part, les villes héritées, correspondant à des cités antérieures reprises, adaptées et intégrées dans le nouvel ordre islamique.

2.1. Villes fondées par les musulmans

Denoix (2008) souligne que la conquête musulmane ne s'est pas contentée d'occuper ou de réaménager les cités héritées des empires byzantin et sassanide, mais qu'elle a très tôt produit ses propres créations urbaines, véritables instruments de pouvoir et de contrôle du territoire. Ces nouvelles villes répondaient d'abord à des impératifs militaires, puisqu'elles naissaient souvent des camps de garnison installés dans des zones stratégiques pour abriter les troupes et encadrer les populations conquises. Elles avaient aussi une fonction politique, en incarnant la présence d'un pouvoir califal ou dynastique qui cherchait à s'affirmer par une capitale inédite.

Sur le plan religieux et urbain, ces fondations plaçaient la grande mosquée au cœur du dispositif urbain, autour de laquelle s'organisaient la vie spirituelle et communautaire, affirmant l'islam comme cadre structurant de la cité. Enfin, elles répondaient aussi à des logiques économiques, en ouvrant de nouveaux marchés et en servant de relais dans les circuits d'échanges régionaux et internationaux. L'originalité de ces fondations est donc d'avoir combiné dans un même projet fonction militaire, organisation religieuse et rayonnement politique, créant des modèles urbains inédits qui allaient durablement marquer l'histoire et la morphologie des villes du monde islamique.

2.1.1. Médine, archétype de l'urbanisation islamique

Selon Mostafa (1981, p.9-46), Médine constitue l'archétype matriciel de la ville islamique naissante après l'hégire. Avant l'arrivée du prophète, « *Yathrib* » se composait d'un ensemble de noyaux tribaux indépendants, organisés en « *Manazil* » (domaines) et « *Bouyut* » (maisons), disposés dans un cadre faiblement hiérarchisé. L'hégire marque un tournant décisif : le prophète opère une réorganisation de l'espace qui devient fondatrice d'un nouvel ordre urbain. Le premier geste est la construction de la mosquée et de la résidence du prophète. Située sur un terrain offert, la mosquée devient immédiatement le centre religieux, politique et spatial de la ville. Autour de ce point, le prophète procède à une distribution de « *Khitat* » (parcelles/territoires) aux différentes tribus des « *Mouhajiriin* » et des « *Ansar* ». Chaque groupe tribal ou clan reçoit ainsi un territoire, dont la subdivision interne reste gérée collectivement par la tribu elle-même. Ce processus imprime au tissu une logique tribale, mais suffisamment flexible pour accueillir de nouveaux arrivants ou agrandir les espaces en fonction des besoins. À proximité de la mosquée, le prophète désigne également l'espace du souk, conçu comme un marché public ouvert, non bâti et non taxé. Sa proximité avec la mosquée, qui renforce le rôle central du binôme mosquée–marché dans l'organisation urbaine. Cette agrégation progressive reflète une organisation économique complémentaire de la centralité religieuse.

Parallèlement, Al-Hathloul (1981, p. 30-34) confirme que la trame viaire de Médine révèle déjà une hiérarchie. Les textes juridiques et chroniques mentionnent des voies dont la largeur est définie entre 6 et 10 coudées (soit environ 3 à 5 mètres), selon l'importance et l'emplacement. Cette hiérarchie distingue les axes principaux reliant mosquée, souk et portes de la ville, des ruelles secondaires desservant les khitat tribaux et menant aux espaces résidentiels. Ainsi, Médine illustre l'archétype de la fondation islamique par :

- L'articulation mosquée–marché comme centre vital.
- La distribution foncière initiale par le prophète, puis son autogestion par les tribus.
- L'ancrage d'une logique tribale évolutive.
- L'esquisse d'un réseau viaire hiérarchisée, qui préfigure les modèles des « *Amsars* » ultérieurs tel que Basra, Koufa, Fustat et Kairouan.

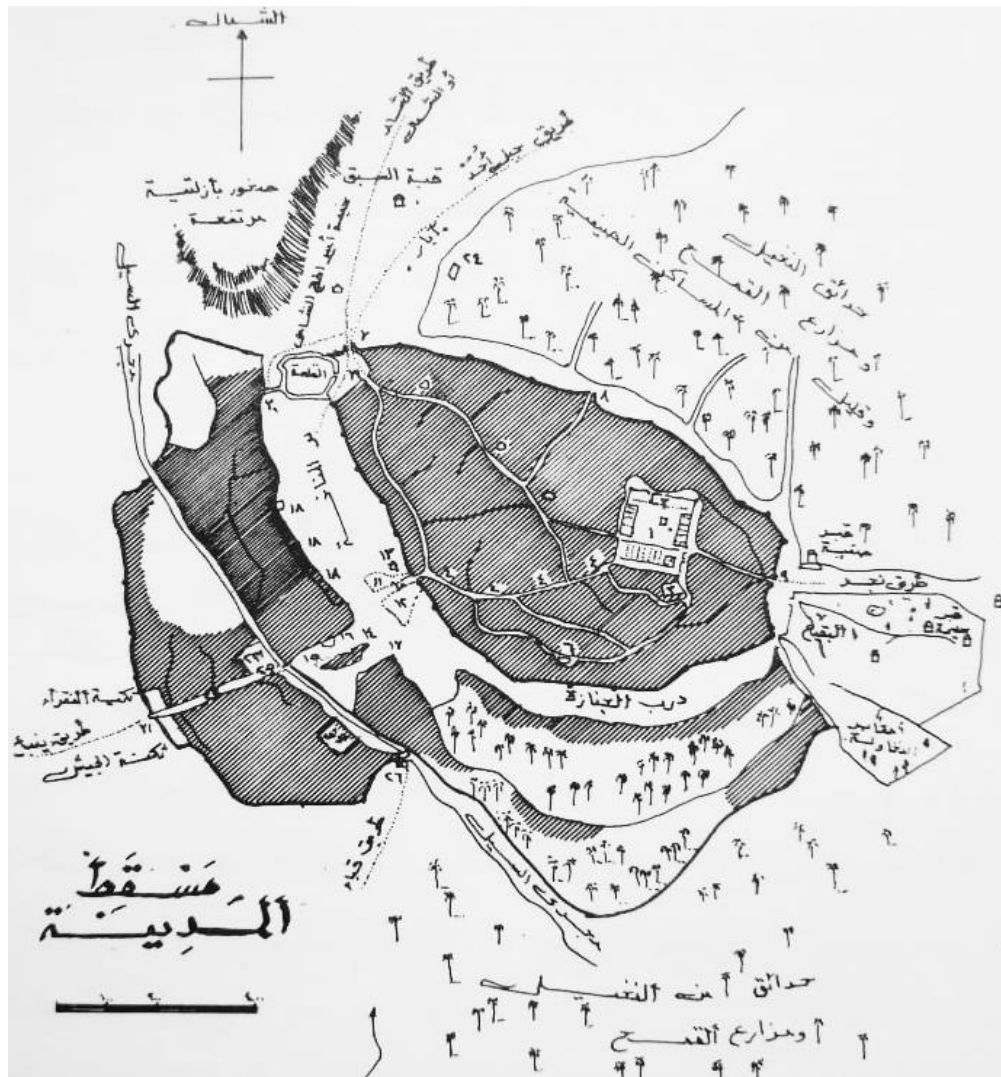


Figure 4.9. Plan hypothétique de Médine à l'époque de prophète. Source : Mostafa (1981).

2.1.2. *Al Amsar*

Akbar (1984, p. 160-197) explique que la politique urbaine des premiers califes, notamment sous Oumar Ibn Al-Khaṭṭab (634-644), a conduit à la création des « *Amsar* » singulier de « *misr* », villes de garnison destinées à accueillir à la fois des fonctions militaires et administratives. Ces fondations répondaient à un besoin stratégique : contrôler les territoires conquis, installer les troupes arabes sans les disperser dans les campagnes, et créer de nouveaux pôles d'autorité. Ainsi, les *Amsar* étaient à la fois des bases militaires, des sièges du pouvoir provincial, et des lieux de rayonnement religieux et commercial. La méthode d'urbaniser ces villes suivait un processus de fondation quasi constant, traduisant un schéma d'organisation cohérent. La première étape était la construction de la mosquée, centre spirituel et institutionnel autour duquel s'articulait l'espace urbain. Ensuite venait la « *Dar al-imara* », ou palais du gouverneur, qui incarnait l'autorité politique et servait de lieu de décision et de commandement. Enfin, on procédait à l'assignation des « *khiṭaṭ* » (singulier *Khitta*) pour tribaux. Ce terme désigne littéralement une parcelle attribuée à un groupe, généralement une tribu ou une fraction tribale, afin de construire son habitat. Les *khitat* constituaient donc des unités foncières de base, délimitées par l'autorité au moment de la fondation, mais laissées ensuite à la libre gestion des habitants dans leur subdivision interne.

Cette urbanisation se structurait par un réseau viaire bien défini. À Koufa par exemple, les largeurs précises étaient fixées : 40 coudées pour les artères principales « *manahidj* », 30 et 20 coudées pour les rues secondaires, et 7 coudées pour les ruelles. Ce système hiérarchisé de voirie garantissait à la fois la fluidité des déplacements et l'adaptation à la structure tribale de la ville. Cependant, à l'intérieur de chaque khitta, la subdivision foncière et la configuration du bâti étaient laissées à l'initiative des habitants, témoignant d'une grande souplesse et d'une responsabilité locale dans la mise en forme de l'espace. À Basra, fondée peu après Koufa, la même logique présida. La mosquée et Dar al-imara furent implantées en premier, puis la répartition des khitat tribaux dessina le canevas urbain. La croissance de Basra fut rapide, sa position stratégique sur le Golfe en faisant une ville portuaire majeure, tout en conservant le schéma initial hérité du modèle médinois. L'expansion prit la forme d'une densification interne et d'un étalement par extension de nouveaux khitat, reproduisant le même principe organisationnel (Alsayyad, 1991, p.85-95). Un autre aspect fondamental est le rôle des souks. Dans la phase initiale, ces espaces de marché étaient ouverts, non bâtis et non taxés, calqués sur le modèle médinois instauré par le Prophète. Ce caractère ouvert répondait à la logique d'accessibilité universelle et d'absence de monopole. Mais au fil du temps, la densification progressive de la ville conduisit au comblement des vides interstitiels entre khitat, ce qui transforma les espaces ouverts en zones construites, ferma les interstices, et donna naissance au réseau tortueux de ruelles caractéristique des médinas islamiques (Akbar, 1984, p. 172-175).

En Afrique du Nord, Fostat et Kairouan comptent parmi les premières fondations urbaines musulmanes et, à l'instar des autres Amsar, elles montrent de quelle manière les structures sociales, religieuses et politiques de l'islam se matérialisèrent et prirent forme dans l'organisation spatiale des villes naissantes. Édifiée en 641 par Amr ibn Al-As, Fostat s'articulait autour d'un noyau institutionnel composé de la mosquée et de la résidence du gouverneur, symboles de l'imbrication entre autorité religieuse et pouvoir politique. Autour de ce centre vital, la répartition en khittat attribués aux tribus arabes reflétait l'organisation sociale de la communauté et prolongeait l'ordre tribal dans l'espace urbain. La ville connut ensuite une croissance progressive et organique, marquée par un tissu irrégulier mais fonctionnel, où la hiérarchie des espaces, la cohésion communautaire et la préservation de l'intimité domestique guidaient les formes urbaines. De son côté, Kairouan, fondée en 670 par Oqba ibn Nafii' comme base stratégique pour la conquête du Maghreb, fut implantée à l'intérieur des terres afin d'échapper aux incursions byzantines. Elle adopta le modèle médinois de base, mosquée centrale, marché et khitaṭ tribaux. Garantissant à la fois cohésion sociale, contrôle territorial et ancrage de l'autorité musulmane. Devenues rapidement plus que de simples campements militaires, ces Amsar se transformèrent en véritables matrices urbaines où la règle juridique islamique et les valeurs communautaires imprimèrent leur marque durable dans la morphologie des cités (Al-Hathloul, 1981, p. 37-44).

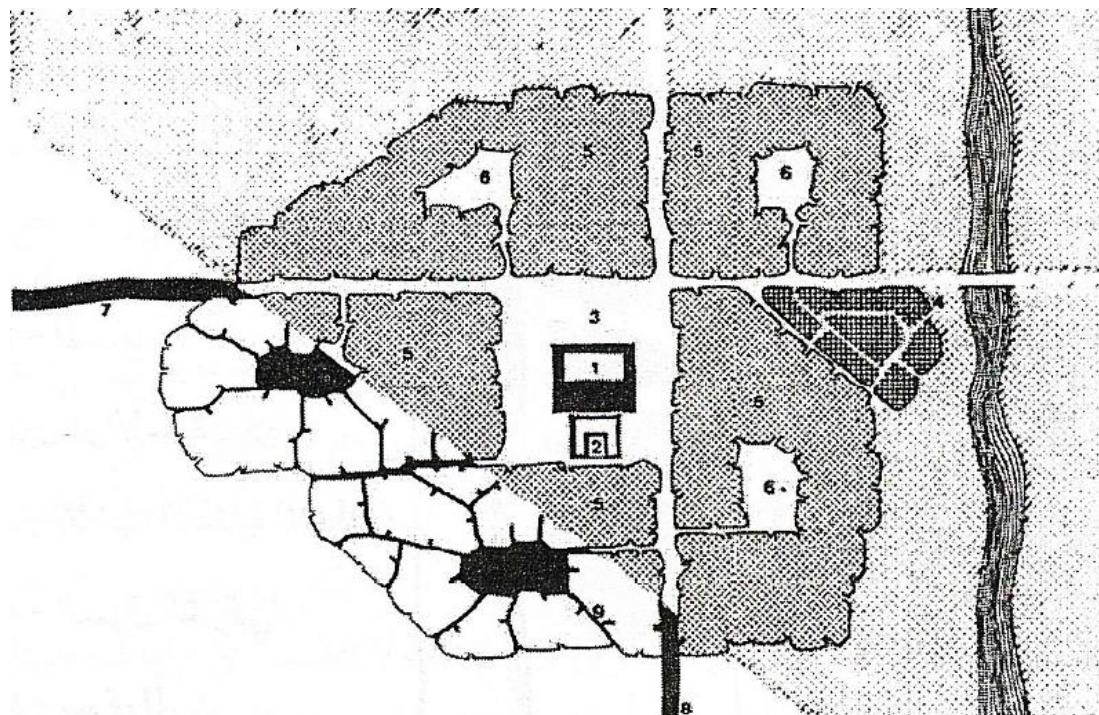


Figure 4.10. Modèle schématique de Basra et de ses khittats. Avec : 1. Grande mosquée, 2. Dar el Imara, 3. Place centrale, 4. Souk, 5. Khita, 6. Mosquée du quartier, 7.8. Rues principales. Source : Alsayyad (1991)

2.2.3. La ville-fort « Ribat »

Al-Hathloul (1981, p. 20-21) et Denoix (2008) distinguent clairement les ribats ou villes-forts comme une catégorie de fondation urbaine aux côtés des Amsar. Le Ribat apparaît d'abord comme un poste militaire avancé, édifié sur les marges du « *Dar al-Islam* » pour protéger les frontières et surveiller les axes stratégiques. Sa morphologie initiale est strictement défensive : une enceinte quadrangulaire ou polygonale, renforcée de tours d'angle et percée de portes limitées, destinée à contenir une garnison. Cependant, ces fortins ne demeurent pas de simples installations militaires. Très vite, leur vocation s'élargit par le biais d'un processus de peuplement et d'intégration fonctionnelle : à proximité de la garnison, un souk se développe pour approvisionner soldats, voyageurs et pèlerins, tandis qu'une mosquée est édifée, conférant au site une centralité spirituelle et sociale. Autour de ces deux pôles se greffent progressivement des khittat accueillant artisans, commerçants et familles, transformant le ribat en une cité organique. Ce processus illustre parfaitement la dynamique islamique de formation urbaine, qui ne repose pas sur un plan imposé de l'extérieur mais sur l'évolution cumulative d'un noyau fonctionnel vers une cité complète, intégrant simultanément dimensions religieuses, sociales, économiques et militaires. Des exemples comme Rabat au Maroc, ou Monastir en Tunisie, témoignent de cette métamorphose : d'un simple ribat destiné à surveiller et défendre la frontière, ils sont devenus de véritables villes-forts habitées, cumulant les fonctions stratégiques, commerciales et spirituelles, et s'inscrivant durablement dans le réseau des cités musulmanes.

2.2.4. La ville princière/capitale

Alsayyad (1991, p. 171-214) et Mortada (2003, p. 65-80) distinguent les capitales princières et califales des Amsar et Ribat : elles naissent d'une volonté dynastique de représentation politique et non d'un objectif militaire. Ces villes sont pensées comme des sièges du pouvoir, structurées autour d'un noyau monumental formé par la mosquée et le palais, symbolisant

l'union du religieux et du politique. L'exemple de Bagdad (fondée en 762 par al-Mansour) illustre ce modèle : son plan circulaire unique, organisé en cercles concentriques autour du palais et de la Grande mosquée, exprime une vision centralisée et impériale du pouvoir abbasside. Elle fut conçue comme une mise en scène urbaine de la grandeur califale. Un siècle plus tard, Samarra (fondée par le calife al-Moutassim) incarne un autre type de capitale princière : une ville linéaire, composée de palais, mosquées monumentales et camps militaires. Elle reflétait un pouvoir plus militaire et itinérant, lié à la présence des troupes turques. Mais son tissu urbain demeura fragile et dépendant de la cour, ce qui en fit une capitale éphémère, construite pour répondre à une crise politique et militaire plutôt que pour durer.

En Afrique du nord, Le Caire fatimide fondée en 969 par Jawhar al-Siqilli, au nom du calife al-Mouizz, s'inscrit dans la logique des capitales dynastiques créées pour affirmer un pouvoir politique et religieux. Conçue comme une ville-palais, « *Al-Qahira* » fut d'abord un espace clos, réservé au calife, à son armée et à l'élite ismaélienne, distinct de Fostat qui demeurait le centre économique. Son organisation traduisait une volonté de mise en scène de l'autorité : l'axe monumental de « *Bayn al-Qasrayn* », encadré par les deux grands palais (oriental et occidental), constituait le cœur de la ville, tandis que la mosquée Al-Azhar, fondée dès l'origine, devenait le pôle religieux et doctrinal du chiisme fatimide. Ce caractère exclusif et palatial se reflétait aussi dans les murailles qui délimitaient strictement la nouvelle capitale. Cependant, la dynamique urbaine brisa progressivement cette clôture : la croissance de la population et l'expansion des activités finirent par intégrer le Caire et Fostat dans une même agglomération. Ainsi, Le Caire fatimide comme un espace politique et idéologique construit ex nihilo, qui, au-delà de sa fonction de capitale dynastique, amorça la formation d'une métropole durable, appelée à devenir l'un des plus grands centres du monde islamique médiéval.

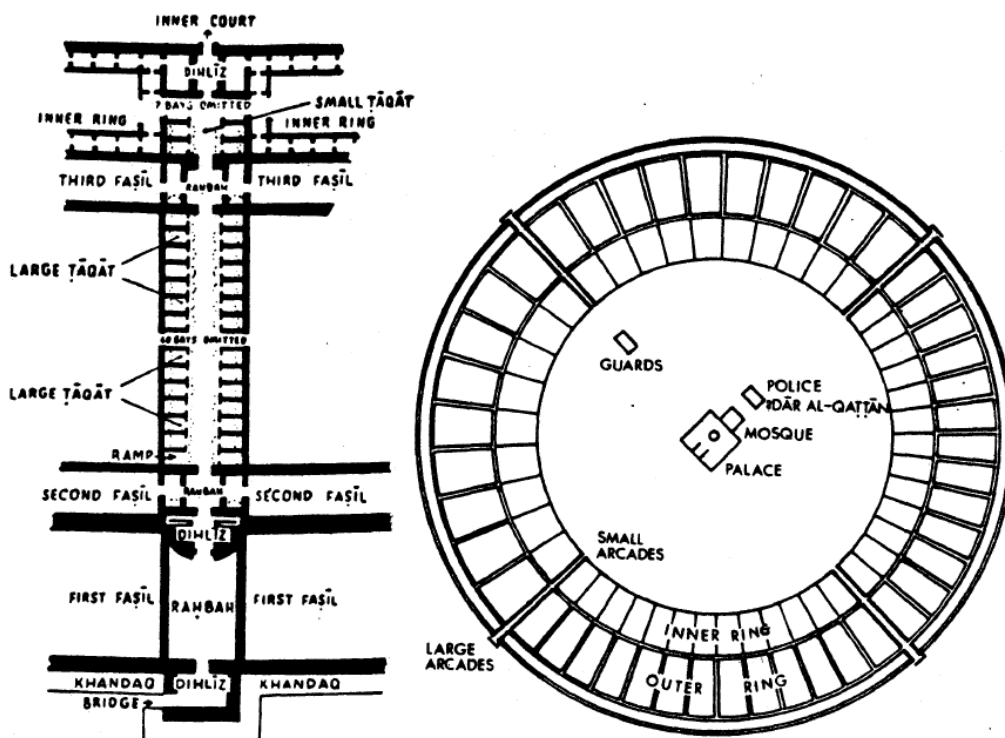


Figure 4.11. Modèle schématique en plan et en coupe de Bagdad à l'époque de sa fondation selon Lassner.
Source : Al-Hathloul (1981).

2.2. Villes héritées

Kennedy (2008) examine les villes que les musulmans trouvèrent en place lors des conquêtes des VII^e et VIII^e siècles, et distingue tout un type particulier nommé les villes héritées. Loin de bâtir un monde totalement nouveau, les premiers califats s'implantèrent dans des réseaux urbains hérités des Byzantins, des Sassanides et, plus largement, du monde gréco-romain. Ces cités, parfois millénaires, telles que Damas, Alep ou Alexandrie, constituaient déjà des centres de pouvoir politique, économique et religieux, et offraient une base solide pour l'établissement de l'autorité islamique. Contrairement à une idée reçue, les conquérants arabes ne détruisirent pas les villes mais les adaptèrent à leurs besoins. Les infrastructures existantes furent largement conservées : les murailles, héritées du monde romain et byzantin, continuèrent d'assurer la défense militaire ; les réseaux hydrauliques, aqueducs et canalisations, essentiels pour l'approvisionnement en eau, furent entretenus et parfois réorganisés. Les souks s'installèrent dans les anciens espaces civiques et devinrent rapidement le cœur économique de la ville islamique. Ainsi, les bases matérielles de l'urbanisme antique furent intégrées dans un nouveau système de valeurs et d'institutions.

Différentes références (Al-Hatloul, 1981 ; Akbar, 1984 ; Alsayyad, 1991 ; Mortada, 2003), parmi d'autres, confirment que ces villes intégrées au dar al-Islam ne connurent pas une rupture radicale, mais une adaptation progressive des cadres urbains hérités des civilisations byzantine, romaine ou sassanide. Ce processus est qualifié d'islamisation et/ou d'arabisation urbaine, en opposition aux qualifications subjectives d'orientalistes tels que Sauvaget, qui l'assimilait à une dégradation et à une dénaturation de l'orthogonalité gréco-romaine vers un prétendu chaos arabe (Raymond, 2008). Les structures préexistantes : trames viaires, enceintes, monuments, furent largement conservées, mais réorientées autour d'une grande mosquée, souvent implantée sur un forum, une basilique ou un temple antérieur, et d'un souk contigu qui devinrent les pivots de la vie religieuse, économique et sociale. Le palais du gouverneur et les institutions islamiques (*waqf*, *cadi*, *hisba*) consolidèrent ce nouveau centre, tandis que le tissu résidentiel se transforma progressivement selon les valeurs du modèle urbain islamique : hiérarchisation des espaces publics et privés, multiplication de ruelles étroites et d'impasses, territorialisation autour de mosquées de quartier. Les villes héritées devinrent ainsi des espaces où les formes antiques furent conservées mais réinterprétées, donnant naissance à une morphologie plus compacte, introvertie et communautaire, inscrivant durablement la centralité de l'islam dans l'organisation urbaine.

Kennedy (2008) souligne que la transformation la plus marquante des villes héritées toucha les espaces religieux : églises et temples furent convertis en mosquées, comme à Damas avec la Grande Mosquée édifiée sur l'ancien temple de Jupiter et la basilique de Saint-Jean, ou à Jérusalem avec le Dôme du Rocher et al-Aqsa implantés sur un site déjà sacré. Ces réaménagements symbolisaient la centralité de l'islam dans la vie urbaine, au-delà de la simple appropriation spatiale. Toutefois, l'héritage urbain variait selon les régions : en Syrie et en Palestine, les villes antiques furent directement remodelées ; en Égypte, la fondation de Fostat compléta le rôle d'Alexandrie ; dans l'Empire sassanide, des cités existantes furent réutilisées aux côtés de nouvelles villes de garnison ; en Afrique du Nord, Carthage céda sa place à Kairouan. Partout, les structures héritées furent réinterprétées par l'introduction d'institutions islamiques (*waqf*, *qadi*, *hisba*). L'urbanisme islamique naissant s'affirma ainsi dans une dynamique de continuité et d'adaptation, transformant les anciennes cités en symboles de la fusion entre l'héritage antique et la nouvelle civilisation islamique.

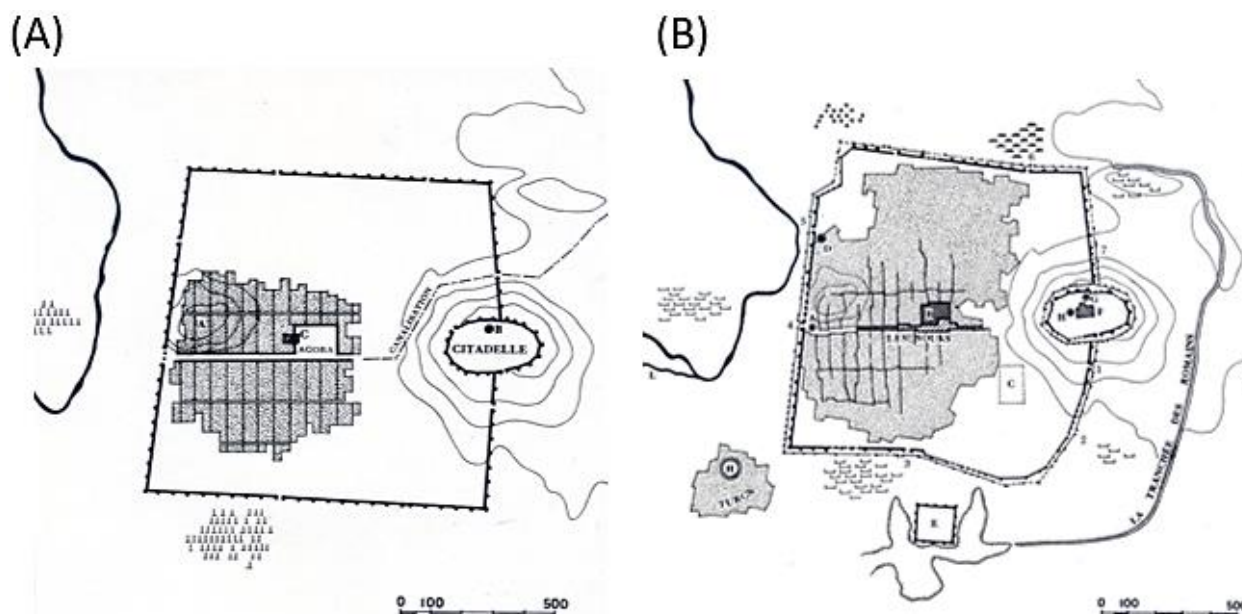


Figure 4.12. Transformation de la structure urbaine d'Alep selon Sauvaget : (A) époque byzantine ; (B) sous le règne islamique. Source : Raymond (1985).

L'examen des origines et de l'évolution historique de la ville islamique met en évidence la pluralité des dynamiques de formation urbaine, oscillant entre fondations ex nihilo et adaptations d'héritages antérieurs. La ville islamique résulte à la fois de fondations ex nihilo et de l'adaptation de villes héritées. Les premières (Médine, Amsar, Ribat, capitales) expriment une volonté de création liée à des enjeux militaires, politiques et religieux, tandis que les secondes (héritées du monde byzantin, romain ou sassanide) montrent une continuité des structures urbaines adaptées aux institutions islamiques. Cette typologie met en évidence des invariants morphologiques (mosquée-marché, khitat, trame viaire hiérarchisée) tout en soulignant la diversité des formes. Elle permet ainsi de dépasser la vision simplificatrice d'une opposition entre planification et spontanéité et d'analyser la morphogenèse islamique comme un processus de création et d'adaptation en constante interaction avec ses contextes.

3. Paradigmes traitant la ville islamique traditionnelle

Après avoir défini les formes urbaines islamiques et retracé leur origine ainsi que leur évolution, il convient désormais d'examiner les principaux paradigmes qui ont structuré et orienté leur interprétation. Ces paradigmes constituent des cadres de pensée théoriques, méthodologiques et idéologiques, à travers lesquels la ville islamique a été conceptualisée, simplifiée, parfois idéalisée ou critiquée, et même réévaluée. Dans ce sens, la réflexion de Kuhn (1972, p. 30-45) sur les paradigmes offre une grille de lecture pertinente. Selon lui, un paradigme est un modèle théorique de pensée partagé par une communauté scientifique, qui englobe théories, lois, méthodes et instruments, et qui détermine la légitimité des problèmes à traiter comme des solutions à envisager. L'histoire des sciences ne relève pas d'une accumulation linéaire de connaissances, mais d'une succession de périodes de science normale dominées par un paradigme donné. L'accumulation d'anomalies non résolues conduit à une crise, laquelle peut déboucher sur une révolution scientifique et un changement de paradigme, inaugurant une nouvelle phase de recherche. Si ce schéma rend compte des mutations majeures des sciences exactes, son application aux sciences humaines et sociales doit être nuancée : les paradigmes coexistent souvent de manière concurrentielle, se chevauchant et s'influençant mutuellement.

Ainsi, l'étude de la ville islamique traditionnelle a été marquée non par une simple succession, mais par une pluralité de paradigmes qui ont façonné des lectures diverses de l'urbain islamique. Chacun de ces paradigmes repose sur un ensemble de présupposés et de postulats qui déterminent non seulement la définition de ce qu'est une ville islamique, mais aussi la manière de l'analyser et d'en rendre compte. Une approche paradigmatique ne se limite pas à la simple description : elle complète les définitions, enrichit l'analyse des caractères morphologiques et affine l'étude typologique des formes urbaines, offrant ainsi une profondeur supplémentaire dans la compréhension scientifique de l'urbain islamique. Dans ce qui suit, nous proposons donc de présenter les principaux paradigmes ayant influencé l'étude de la ville islamique traditionnelle, en mettant en lumière leurs fondements théoriques, leurs ambitions explicatives ainsi que leurs limites critiques.

3.1. Récits de voyageurs

À partir du Xe siècle, les géographes et explorateurs musulmans tels qu'Al-Muqaddasi, Al-Baki, Ibn Battuta et bien d'autres entreprirent des voyages marqués par une démarche empirique fondée sur l'observation directe. Leurs récits, motivés par des raisons scientifiques, religieuses (notamment le pèlerinage à La Mecque) ou commerciales, témoignent d'une véritable approche empirique. Ces témoignages appuient la compréhension des villes islamiques, offrant une multiplicité de perspectives sur la vie quotidienne, l'architecture, l'urbanisme, le commerce et les interactions sociales. Ils décrivent les composantes architecturales (mosquées, palais, marchés, fortifications), les dynamiques urbaines (activités commerciales, artisanat, sociabilité), la géographie des lieux (emplacement, climat, ressources naturelles) ainsi que la diversité des populations (ethnies, religions, coutumes). Ces récits ont eu une influence notable sur le développement des études orientalistes, en fournissant des données de recherche (Haneda, 2013). Parallèlement, les voyageurs européens ayant parcouru les villes islamiques ont produit des récits décrivant l'architecture des différents équipements et les espaces urbains, mais aussi les coutumes et traditions des habitants. Ces écrits traduisent à la fois une curiosité sincère et un émerveillement, tout en véhiculant parfois les préjugés propres à leurs auteurs. La Casbah d'Alger, à l'instar d'autres villes islamiques, a ainsi fait l'objet de nombreuses observations. Les témoignages d'auteurs tels qu'Al Wazzan, Haedo, Shaw et bien d'autres représentent une contribution essentielle à la constitution d'un savoir empirique (Cresti, 2005).

Les récits de voyageurs constituent une source primaire pour l'étude des villes islamiques traditionnelles. Ces témoignages allient observation directe et narration. Ils offrent une documentation précieuse et des descriptions détaillées de la structure urbaine, des pratiques sociales et de la composition démographique. Cependant, ces sources présentent des limites qu'il convient de souligner. Les voyageurs musulmans privilégient souvent une perspective spirituelle, érudite ou descriptive, valorisant les institutions religieuses, les pratiques pieuses et l'organisation sociale, parfois au détriment d'une analyse détaillée des formes bâties et des dynamiques urbaines. Les voyageurs européens, bien que généralement plus attentifs à l'architecture, aux marchés et aux paysages urbains, produisent des descriptions influencées par leurs propres grilles de lecture. Leur regard, marqué par l'étonnement, l'exotisme ou le jugement subjectif, tend à projeter sur les villes islamiques des représentations stéréotypées balançant entre fascination et dévalorisation. Dans les deux cas, ces sources sont empreintes de jugements de valeurs et ne peuvent être considérées comme neutres. Elles nécessitent donc une lecture critique et contextualisée, prenant en compte l'intention de l'auteur, le contexte historique de l'écriture et les influences culturelles implicites. Ces récits bien que limités, ont constitué un matériau de base pour les orientalistes,

qui les ont souvent réinterprétés et intégrés dans une grille théorique plus large, contribuant ainsi à forger le paradigme orientaliste.

3.2. L'orientalisme

Said (1980, p.14) définit l'orientalisme comme une discipline académique dominée par des chercheurs occidentaux qui, du XVIII^e au XX^e siècle, ont étudié les sociétés, les langues, les littératures, les religions, les philosophies, les histoires, les arts et les lois du Proche-Orient. Il est également un système de pensée et un discours de pouvoir. Conjointement, les études orientalistes sur la ville islamique traditionnelle ont constitué le point de départ et ont ouvert la voie à une série d'explorations scientifiques (Neglia, 2008). Ces études se sont souvent appuyées sur des méthodologies développées en occident, puis projetées dans le contexte urbain islamique. Cette approche était marquée par une pensée dichotomique et comparative, s'inspirant notamment de Max Weber et de l'école de Chicago (Al-Lahham, 2004). En effet, l'orientalisme débuta avec les expéditions archéologiques qui accompagnaient le colonialisme européen. Sur le plan scientifique, l'article fondateur était celui de Marçais (1928), où il affirmait que l'islam est une religion intrinsèquement citadine, pour laquelle la vie en ville est le moyen de respecter les obligations de la foi. Marçais, en employant les termes « ville arabe » et « ville musulmane » l'a décrit comme composée principalement d'une mosquée-cathédrale pour la prière du vendredi et d'un bazar, symbolisant respectivement son utilité spirituelle et matérielle. Cependant, ces études n'étaient pas à l'abri des généralisations et des évaluations subjectives. De nombreux jugements de valeur ont entaché les résultats de la recherche et continuent d'influencer notre compréhension (Abu-Lughod, 1987).

Par ailleurs, Neglia (2008) confirme que ces études orientalistes s'inscrivaient sur deux grandes approches : une anglaise basée sur les intérêts historiques archéologiques et une autre française basée sur les monographies architecturales et les descriptions physiques de la structure urbaine. La première représentait la ville islamique comme un horizon théorique plus que réel. Alors qu'avec plus de connaissance tangible sur le terrain, la ville islamique selon la tradition française est un ensemble à décrire pour le contrôler militairement et politiquement. Ces approches furent portées par différents chercheurs emblématiques de l'orientalisme classique, tels que : William et George Marçais, Jean Sauvaget, Keppel Creswell, Roger Le Tourneau ..., et bien d'autres. Ils étudiaient différentes villes nord africaines et syriennes selon divers axes : architectural, urbanistique, social, et économique. Bien qu'ils utilisaient différentes méthodologies, ils défendaient l'hypothèse d'un modèle urbain unanime (AlSayyad, 1991, p. 42-47). Ce modèle décrivait le tissu urbain islamique comme organisé autour d'une grande mosquée centrale, d'un organisme de marché et de quartiers fragmentés. Le marché, disposé de la mosquée aux portes de la ville, se trouve associé à différents équipements spécialisés, tandis que les quartiers sont divisés selon des critères ethniques et religieuses. En absence de lignes droites, et dans un sens dévalorisant, la ville islamique est décrite comme ambiguë. Elle est également présentée comme irrationnelle et spontanée, produit d'un long moyen âge et d'absence d'institutions municipales. Un des concepts clés de cette approche était la comparaison entre la grille gréco-romaine orthogonale et le réseau viaire des villes islamiques. La dimension étroite des rues, les dispositions

d'emboîtement, la fréquence d'impasses et en général la forme irrégulière du réseau viaire conduisaient à ces conclusions (Raymond, 1994 ; 2008).

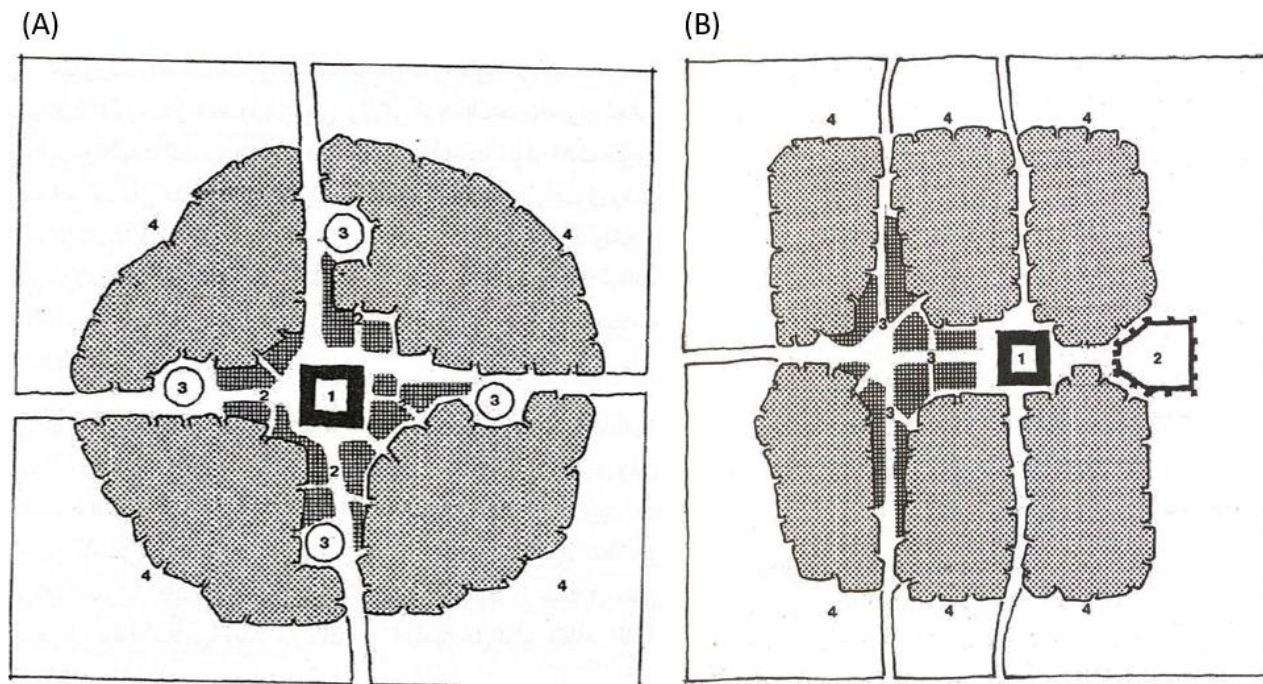


Figure 4.13. Modèle schématique de la ville islamique selon l'approche orientaliste : (A) d'après Marçais, avec : 1. mosquée centrale, 2. marché, 3. bains publics, 4. quartiers résidentiels ; (B) d'après Sauvaget avec : 1. mosquée centrale, 2. palais, 3. marché, 4. quartiers résidentiels. Source : AlSayyad (1991).

L'orientalisme demeure le paradigme de référence le plus influent. De nombreux auteurs, tels qu'Allain (2004, p. 36-76), en reprennent encore largement les cadres interprétatifs. Ainsi, il définit la ville islamique comme : « *Un maillage spécifique fait de rues étroites et maisons à patio, serrées comme des grains de grenade et organisées autour des points de convergence que sont le Souk et la grande mosquée. L'islam interdisant de construire en hauteur, les gains se font aux dépens de l'espace public déjà restreint à la rue et que le droit musulman défend mal. Les traces demeurent dans toutes les villes des pays ayant connu une longue période de domination musulmane, malgré les transformations mais les tissus islamiques sont résiduels dans les grandes villes.* » et le plan introverti comme : « *Caractéristiques des villes islamiques traditionnelles, il est marqué par la fermeture, une organisation arborescente, un aspect labyrinthique : l'irrégularité et la sinuosité des rues, la fréquence des impasses. En fait cette irrégularité, ce désordre serait dans ce cas le résultat d'une évolution anarchique due à l'absence d'urbanisme et de pouvoir municipal. Il est souvent issu de la déformation d'un maillage quadrillé hellénistique (centre de Damas). C'est la traduction spatiale d'une organisation sociale : hiérarchisation et disposition concentrique autour de la grande mosquée, souvent située à l'emplacement de l'agora ou du forum des villes préexistantes.* »

En somme, le paradigme orientaliste a longtemps dominé le savoir en imposant un modèle urbain unique et essentialiste. Selon cette vision, la ville arabe se caractériserait par l'absence d'institutions municipales, une planification urbaine irrationnelle, une économie parasitaire dépendante des campagnes, et une organisation sociale fondée sur des structures familiales et religieuses plutôt que sur des corps civiques. Ce discours, profondément euro centrique, favorisait une vision normative et subjective qui reposait sur la projection de

modèles occidentaux et sur une comparaison avec la cité gréco-romaine considérée comme l'idéal de rationalité. En conséquence, l'organisation urbaine islamique était expliquée à travers une lecture extérieure, réduite à des dichotomies simplificatrices, au détriment de la prise en compte des facteurs économiques, politiques ou environnementaux propres à chaque contexte. Cette perspective statique et descriptive se concentrait sur quelques traits morphologiques, comme les ruelles, et généralisait des observations ponctuelles faites au Maghreb à l'ensemble du monde islamique, en ignorant la diversité régionale et temporelle des expériences urbaines. En tant que discours savant mais aussi outil de pouvoir, il a contribué à construire une image dévalorisée et homogénéisée de la ville islamique.

3.3. Marxisme

En parallèle aux lectures orientalistes, s'est développée une approche marxiste de la ville islamique. Alors que l'orientalisme expliquait la forme urbaine selon une approche comparative de la structure urbaine et par des facteurs religieux et institutionnels, l'analyse marxiste mettait l'accent sur les rapports de production, les divisions sociales et les dynamiques économiques. Ce paradigme, qui s'est affirmé dans les années 1960, envisage la ville islamique comme un produit historique des conflits de classes et des structures socio-économiques. Bien que différents chercheurs ne se revendiquent pas explicitement du marxisme, leurs analyses des villes islamiques présentent des affinités et un rapprochement avec le matérialisme historique : la forme urbaine apparaît comme le reflet des rapports sociaux et économiques, où tribus, métiers et classes façonnent l'organisation des rues, des marchés et des équipements collectifs. La ville se révèle ainsi comme le produit d'interactions socio-économiques, anticipant des principes proches de l'analyse marxiste de l'espace urbain.

Massignon (1935), dans son étude de la ville de Koufa, propose un modèle interprétatif de l'urbanisme fondé sur les déterminants socio-économiques et la dynamique des classes sociales. Il considère que l'environnement bâti est le produit de la lutte entre différentes classes socio-économiques, chaque groupe laissant son empreinte sur la forme et l'organisation de la ville. En s'appuyant sur les « khittat » et les « kataii », fragments textuels décrivant l'occupation et l'organisation des espaces par les différentes tribus, ces sources permettent de comprendre comment celles-ci s'installent, structurent les quartiers, organisent les rues et les marchés, et définissent l'emplacement des équipements collectifs. La ville n'apparaît donc pas comme un ensemble homogène, mais comme le résultat d'une interaction entre pratiques sociales, activités économiques et implantation tribale. Massignon montre que la structure sociale et économique, ainsi que la répartition des corps de métiers, influencent directement l'organisation urbaine. Il introduit ainsi le concept de « topographie économique » : la morphologie de la ville reflète la hiérarchie et les interactions des groupes sociaux, économiques et professionnels. Cette perspective permet de relier la forme urbaine aux activités et aux relations sociales, et non uniquement à des critères architecturaux ou morphologiques. En effet, loin d'être un marxiste déclaré, Massignon a développé une approche s'apparentant au matérialisme historique. Son modèle a été repris et appliqué par Saleh El Ali (1969) (cité par Akbar, 1994) pour l'analyse de Basra au Ier siècle, démontrant ainsi son utilité pour l'étude comparative des villes islamiques et la compréhension de l'impact des facteurs socio-économiques sur l'organisation spatiale des villes.

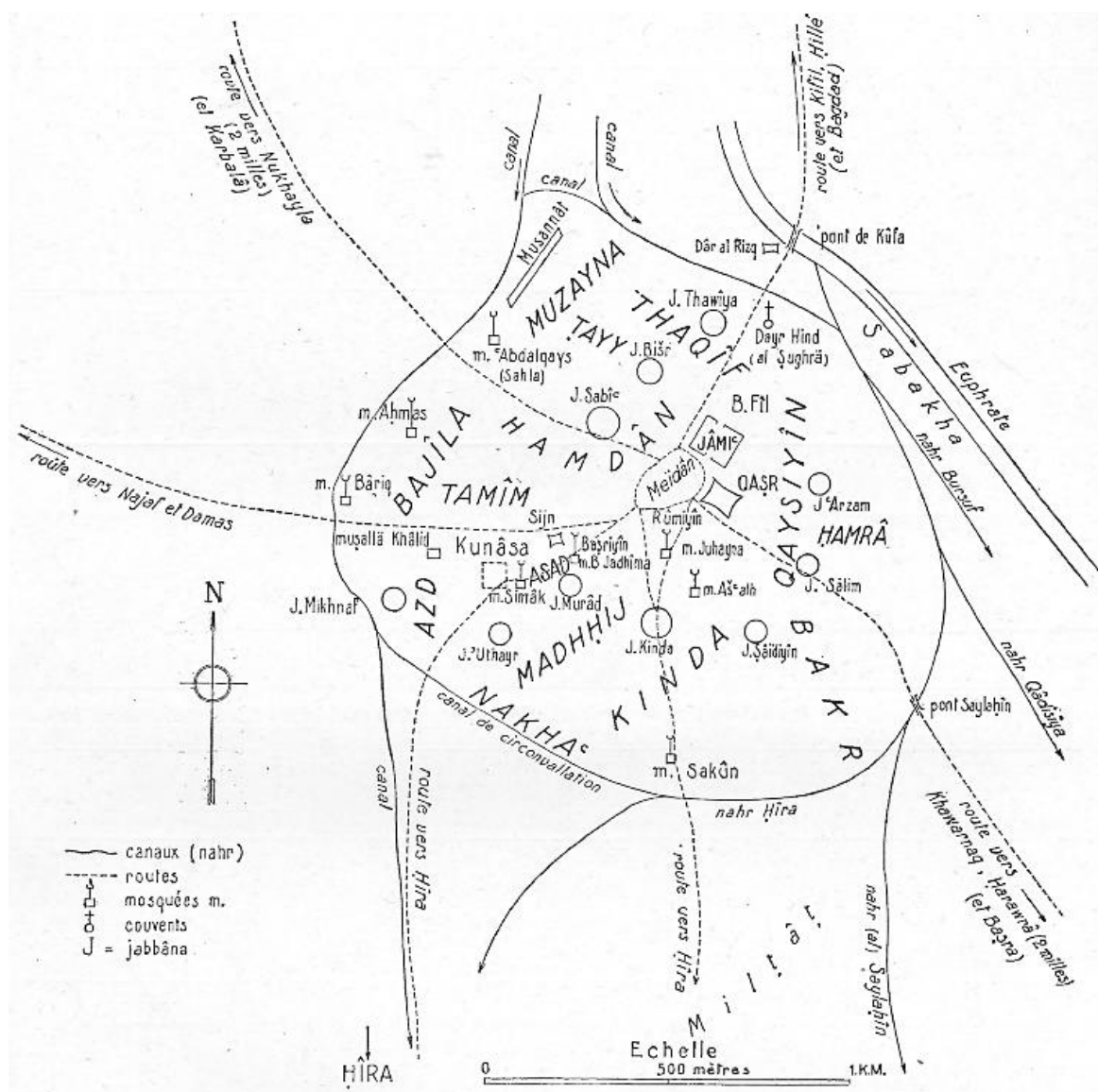


Figure 4.14. Khittat de Koufa à l'aube de sa fondation. Source : Massignon (1935).

Massignon, sans être marxiste, peut être considéré comme l'initiateur d'une lecture de la ville islamique qui sera reprise par les historiens marxistes. Dans ce prolongement, Cahen (1955), marxiste affiché, a proposé une analyse de la ville islamique en mettant l'accent sur ses aspects socio-économiques. Son étude, centrée notamment sur les grandes villes mameloukes telles que Le Caire et Damas, porte sur les activités économiques, les structures sociales, et sur les relations entre la ville et la campagne, considérées comme essentielles pour comprendre le fonctionnement urbain. Il a également examiné l'organisation spatiale de la ville, en tenant compte des facteurs topographiques, climatiques et culturels, soulignant que la morphologie urbaine ne peut être dissociée de son contexte environnemental et historique. Sa démarche adopte une perspective historique dynamique, envisageant la ville islamique comme un espace en constante évolution, soumis aux transformations politiques, économiques et sociales. S'inspirant de la théorie marxiste des classes sociales, il avance l'hypothèse selon laquelle le déclin de la ville islamique après le XIII^e siècle résulterait de la détérioration et de la corruption de la classe dirigeante, ce qui aurait entraîné une perte de dynamisme économique et institutionnel. Cette approche permet de relier la trajectoire historique des villes islamiques à l'évolution des rapports sociaux et des structures économiques, mais elle

tend aussi à réduire la forme urbaine à une causalité unique, privilégiant la lutte des classes au détriment d'autres facteurs explicatifs.

Lapidus (1967) cristallise le paradigme marxiste sur la ville islamique en affirmant qu'elle est profondément façonnée par les conflits et divisions entre classes sociales. En étudiant des villes mameloukes comme Damas, Alep et Le Caire, il met en évidence que la morphologie urbaine, ruelles étroites fermées par des portes, impasses impénétrables, organisation labyrinthique des quartiers, n'est pas le fruit du hasard, mais le résultat direct de stratégies de contrôle, de protection et de ségrégation mises en place par les différentes factions. Selon Lapidus, les relations politiques, sociales et économiques entre groupes structurent l'espace urbain de manière autonome, si bien que la ville apparaît comme le produit concret de luttes internes, parfois en l'absence d'un appareil gouvernemental central fort. L'espace urbain reflète ainsi, de façon matérielle, les rapports de force et la dynamique conflictuelle des classes, inscrivant dans la forme bâtie l'histoire des rivalités sociales et communautaires.

Bien que le paradigme marxiste ne reproduise pas directement la thèse orientaliste, il en conserve certaines idées. En soulignant la société des notables et l'absence d'institutions autonomes, il rejoint parfois des conclusions similaires, notamment l'image de la ville comme espace labyrinthique et chaotique, même s'il en propose une lecture plus nuancée. Sa principale limite réside dans son déterminisme économique, qui tend à réduire la complexité urbaine à un seul facteur, au détriment des dimensions religieuses, politiques et culturelles. De plus, s'il éclaire de manière pertinente les villes de fondation comme Koufa ou Basra, il s'applique plus difficilement aux grandes cités islamiques. Malgré ces limites, l'approche marxiste offre une lecture complémentaire à l'orientalisme et ouvre la voie à une compréhension reliant la forme spatiale aux rapports sociaux et économiques.

3.4. Fonctionnalité, organisation spatiale et structurelle

Von Grunebaum, (1955), propose une lecture fonctionnelle de la ville islamique. S'appuyant sur les modèles de William Marçais et de Jean Sauvaget, il réexamine l'impact des équipements urbains sur l'organisation spatiale et structurelle. Selon ce paradigme, la fonction constitue le moteur de la morphologie urbaine. La description qu'il en donne insiste sur le caractère détaillé de la forme urbaine : chaque élément de la ville possède sa propre configuration, son emplacement spécifique et exerce une influence distincte sur l'ensemble. Par ailleurs, Grunebaum établit une analogie entre la civilisation islamique et les civilisations antiques ou chrétiennes, en rapprochant la mosquée de l'église ou du temple, tant du point de vue de leur emplacement que de leurs effets structurants. La ville islamique est ainsi représentée comme étant organisée autour d'un noyau central, constitué de la mosquée, de la médersa, de la place et des principaux équipements, auxquels s'ajoutent les bains et les marchés. Ces derniers se répartissent hiérarchiquement en fonction de leur proximité ou de leur éloignement par rapport à la mosquée. Toutefois, cette approche demeure limitée, puisqu'elle ignore les dimensions sociales et jurisprudentielles qui ont pourtant joué un rôle fondamental dans le façonnement et l'évolution de la ville islamique.

En effet, à partir des années 1950, avec la fin du colonialisme, de nouvelles recherches sur la ville islamique commencèrent à remettre en cause l'orientalisme et sa vision négative (Petrucchioli, 2002). Ce tournant fut marqué par des travaux collectifs et des conférences,

parmi lesquels ceux de Hourani et Stern (1970) ainsi que d'Ilbert (1982). Ces nouvelles approches, davantage ouvertes à la géographie urbaine et aux sciences sociales, visaient à dépasser les interprétations essentialistes héritées de l'orientalisme. À travers des modèles d'évolution et d'analyse urbaine, elles proposaient de repenser la ville islamique sous l'angle de son organisation fonctionnelle et structurelle, offrant ainsi une lecture renouvelée de sa morphogenèse. Dans cette dynamique, des chercheurs tel que Philippe Panerai et Jean-Claude Garcin, développèrent un modèle d'interprétation fondé sur l'évolution politique, la fonctionnalité globale, et la morphologie des villes (Guichard, 1998). Selon cette perspective, la forme urbaine est conditionnée par le rôle assigné à la ville, qu'elle soit capitale politique, centre militaire ou pôle économique, et par la manière dont ces fonctions structurent l'espace et orientent son développement.

Raymond (1985) ainsi que dans plusieurs recherches ultérieures, s'inscrit dans ce changement de paradigme en renouvelant profondément l'approche de la ville islamique. Il proposa de la définir comme une ville arabe, remettant en question les modèles, hypothèses et conclusions fondatrices de l'orientalisme, qu'il qualifia de « mythe ». Il confirma l'existence d'un système urbain interne, bien défini et dynamique, et reconnut l'authenticité de l'organisation fonctionnelle et structurelle. Contrairement aux paradigmes précédents, son analyse intégrait pleinement les aspects sociaux et jurisprudentiels, en particulier le rôle central du waqf, dans le façonnement et l'évolution de l'espace urbain. Il mit également en évidence la centralité comme principe fondamental de l'organisation urbaine, à différentes échelles, ainsi que la hiérarchie présente dans le réseau viaire et dans la structure globale de la ville. À travers ses travaux, il analysa un large éventail de villes islamiques à l'époque ottomane, telles que Le Caire, Alger, Constantine, Tunis, Damas, Alep, Bagdad et Mossoul, démontrant la richesse et la diversité de leur évolution urbaine au cours des trois derniers siècles de la domination ottomane.

Malgré l'évolution des recherches et le dépassement partiel des idées orientalistes, les modèles proposés restent largement centrés sur des descriptions morphologiques statiques, souvent représentées par des structures radioconcentriques. Ces approches se limitent à l'analyse d'un produit urbain fini, sans restituer les processus évolutifs et interactifs qui ont conduit à sa formation. Comme le souligne Akbar (1994), elles s'attachent davantage à documenter la forme finale qu'à étudier les mécanismes internes responsables de sa production, ce qui réduit leur portée explicative et empêche une compréhension véritablement dynamique de la morphogenèse. Si ces modèles permettent de saisir certains aspects fonctionnels et structurels de la ville islamique, ils restent insuffisants pour rendre compte de la complexité des interactions sociales, économiques, religieuses et jurisprudentielles qui façonnent l'espace urbain. La centralité de la mosquée, la hiérarchie des marchés ou encore l'influence des waqf, par exemple, sont difficilement intégrées dans une approche purement fonctionnaliste. Une analyse pertinente de la ville islamique exige donc une perspective systémique et multidimensionnelle.

3.5. Planification, rapport autorité / habitants

Ce courant de recherche émerge dans le contexte des révisions historiographiques des années 1980, période marquée par une volonté de réexaminer les interprétations occidentales de la ville islamique traditionnelle. Alors que la thèse orientaliste avait souvent présenté ces villes comme des ensembles urbains spontanés, irréguliers et dénués de planification consciente, plusieurs chercheurs originaires du monde islamique ont entrepris de déconstruire ces stéréotypes. Leur objectif principal était de démontrer que les villes islamiques étaient, en réalité, organisées selon des principes structurés, et que la planification urbaine obéissait à des logiques spécifiques, reflétant à la fois l'ordre social et l'autorité politique.

Ce paradigme se situe dans le même champ d'analyse que les orientalistes, mais en adoptant une perspective opposée. Plutôt que de considérer le désordre apparent comme une caractéristique intrinsèque des villes islamiques, ces chercheurs ont cherché à corriger les préjugés et à réhabiliter une image plus nuancée et documentée de la planification et du contrôle urbain. Les figures majeures de cette recherche incluent Kadem Al Janabi (cité par Akbar, 1984), dans son analyse de Koufa ; Djait (1986), qui a étudié en profondeur les premières villes islamiques et notamment Koufa ; et AlSayyad (1991), dont les travaux examinent organisation et structure urbaine et le rôle des califats. Ces recherches mettent en évidence que les villes étaient souvent conçues selon des principes orthogonaux ou modulaires, combinant rigueur structurelle et adaptation aux contraintes topographiques et climatiques. L'appui sur les sources historiographiques classiques, telles que : Al-Hamawi, Al-Baladhuri, Ibn Asakir, Al-Tabari ou Al-Maqrizi, donne à ces analyses une légitimité scientifique. Cette démarche souligne l'articulation entre planification centralisée et régulation sociale, illustrant comment l'autorité politique organisait l'espace urbain pour structurer les interactions entre habitants et institutions.

Ce courant historiographique apporte une contribution essentielle à la compréhension de la ville islamique en réhabilitant l'idée de planification et de contrôle centralisé, tout en soulignant la nécessité d'intégrer les pratiques locales et la dimension. Cependant, il présente certaines limites. En centrant l'analyse sur le rôle de l'autorité politique, il tend à minimiser l'influence des habitants et des dynamiques locales dans la formation urbaine, alors que les pratiques quotidiennes, les adaptations locales constituaient des éléments essentiels de l'évolution de la ville. De plus, la dépendance quasi exclusive aux sources classiques, centrées sur les élites et l'administration, peut conduire à une vision partielle et normative de la ville, négligeant l'expérience réelle des habitants et la dimension dynamique et adaptative de l'urbanisme islamique. Ainsi, si ce courant réhabilite la rationalité de la planification et corrige les stéréotypes orientalistes, il reste partiel et relativement statique.

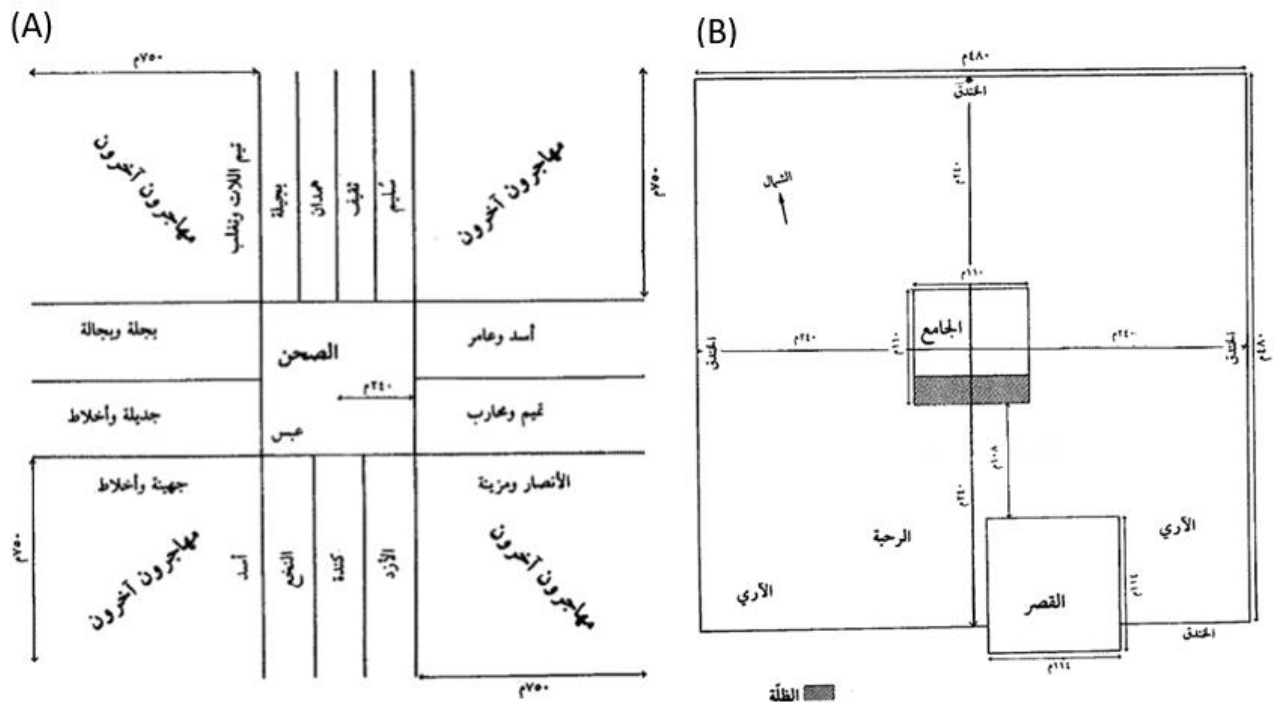


Figure 4.15. Fondation de la ville de Koufa : (A) Khittat ; (B) Sahn composé de la mosquée centrale et du palais du gouverneur. Source Djait (1986).

3.6. Régionalisme critique, culture et contexte

Parallèlement aux nouvelles directions sur la ville islamique déclenchées depuis les années 1950 et concrétisées dans les années 1980, un autre courant critique apparaît. Illustré par les travaux de Kuban (1985), il remet en question l'idée même d'une ville islamique. Selon ce paradigme, cette notion est artificielle et a été construite par les orientalistes occidentaux pour simplifier l'étude de l'environnement bâti dans le monde islamique comme une unité homogène. En réalité, aucune ville islamique unique n'existe. L'application d'un modèle unifié masque la diversité régionale et conduit à des généralisations erronées. Kuban souligne que si les chercheurs étaient contraints d'examiner séparément les architectures de l'Égypte, du Maghreb, du Levant ou du Golfe, la tâche serait beaucoup plus complexe. Pour simplifier leur analyse, ils ont créé un « parapluie conceptuel », englobant sous les termes de « ville islamique » et « architecture islamique » des réalités profondément hétérogènes. Cette critique se traduit concrètement par l'observation de fortes divergences : par exemple, une mosquée en Chine est architecturale et spatialement plus proche des habitations chinoises locales que des mosquées du Maghreb. De même, une maison musulmane au Maghreb présente davantage de similitudes avec une maison andalouse qu'avec une maison musulmane en Inde. Ainsi, ce paradigme soutient qu'il existe plutôt une « architecture régionale », façonnée par la diversité des contextes climatiques, des matériaux, des traditions et des coutumes. Une région isolée peut produire un modèle architectural relativement homogène, mais une région centrale comme le monde islamique, en contact permanent avec de multiples cultures, ne peut générer une architecture uniforme.

Dans la même perspective, Rudofsky (1964) soulignait que la ville est avant tout le produit de la culture, du contexte, du climat et des matériaux de construction. Son approche

s'inscrit dans une perspective où l'environnement bâti n'est pas conçu uniquement par des architectes formés, mais émerge des pratiques vernaculaires et des besoins locaux. Rudofsky propose ainsi un modèle de ville vernaculaire qualifiée « d'islamique », qui se distingue des descriptions classiques statiques de la ville islamique héritées de l'orientalisme. Selon lui, l'authenticité de la structure urbaine réside notamment dans son réseau viaire, qui reflète à la fois l'adaptation aux contraintes locales et l'organisation sociale, plutôt que dans l'application de règles abstraites ou théoriques. Dans le même esprit, Rapoport (1969) propose une approche géographico-historique et socio-culturelle, retraçant l'impact de la culture et de l'environnement sur la forme de la maison, considéré comme l'élément fondamental de l'architecture et de l'urbanisme. Cette perspective renforce l'idée que l'environnement bâti islamique doit être compris à travers les particularités régionales et culturelles, et non comme une entité monolithique.

Malgré sa pertinence pour souligner la diversité régionale et l'importance des contextes culturels, climatiques et matériels dans la formation de l'environnement bâti, le paradigme du régionalisme critique présente plusieurs limites. En insistant sur les particularismes locaux, il tend à sous-estimer les caractéristiques communes et les principes structurants partagés par les villes islamiques, réduisant ainsi sa capacité à identifier des tendances générales et à expliquer les similitudes morphologiques ou fonctionnelles observées dans des villes géographiquement éloignées, comme la centralité de la mosquée, l'existence du souk ou l'organisation des quartiers. En rejetant l'idée d'un « parapluie conceptuel » islamique, ce paradigme risque également de négliger l'influence de l'Islam sur les pratiques sociales et les institutions, qui structurent directement l'espace urbain. Sa focalisation sur les contextes régionaux rend les comparaisons interrégionales difficiles aussi et limite la construction de cadres théoriques globaux. En plus, son approche qualitative et descriptive manque parfois d'outils analytiques pour relier dynamiques sociales, économiques et politiques à la forme urbaine. Enfin, en minimisant le rôle des autorités et des institutions, il peut offrir une vision fragmentée et statique de l'urbanisme, et l'accent mis sur la singularité de chaque région comporte un risque de relativisme excessif, négligeant les échanges culturels et les influences historiques qui relient les différentes régions du monde islamique.

3.7. Processus et mécanismes juridiques

Akbar (1994) rappelle que le paradigme guide le processus de production scientifique sur la base de vues philosophiques et doctrinales avec des conditions logiques et rationnelles auxquelles les chercheurs croient en tant que principes édictés. Étant donné que la civilisation occidentale était pionnière dans la production scientifique au cours des derniers siècles, la science existante est le produit et la traduction de sa pensée et de ses idéaux. Les principes paradigmatiques de la science occidentale sont souvent antagoniques aux principes islamiques. Considérant que la ville influence la condition des habitants et reflétant les valeurs d'une société, les paradigmes occidentaux restent inadaptés pour comprendre la ville islamique en raison de leur décalage avec la vision islamique. Par conséquent, un cadre conceptuel doit être élaboré conformément à la vision civilisationnelle islamique pour étudier et analyser la ville islamique. Dans ce sens, et dans le contexte du renouvellement des idées sur la ville islamique dans les années 1980, un changement de paradigme s'est affirmé à

travers une série de travaux scientifiques majeurs (Al-Hathloul, 1981 ; Akbar, 1984 ; Hakim, 1986). Cette approche ne vise pas à opposer radicalement paradigmes occidentaux et islamiques, mais à mettre en évidence la spécificité des processus juridiques et sociaux qui structurent la ville islamique traditionnelle et qui nécessitent des outils analytiques adaptés pour en saisir la complexité.

Simultanément, une série de conférences organisée en 1980 à l'université King Faisal en Arabie Saoudite, et animée par différents chercheurs : Stanford Anderson, Ronald Lewcock, Miles Danby, Salah Al-Hathloul, Jamel Akbar et Besim Hakim. Ce qui a permis de compléter cette vision qui contribue à définir la ville islamique non seulement comme une entité spatiale statique, mais comme un environnement dynamique, résultant d'un processus actif de symbiose entre les principes juridiques islamiques « *Fiqh* » et les multiples facteurs intervenant dans sa production. Les différents travaux sont appuyés sur l'analyse de Brunschvig (1947) qui constituait une exception dans le contexte scientifique influencé par l'orientalisme. Il s'agissait une contribution majeure à l'étude de la ville islamique, notamment à travers l'exploitation des manuscrits d'Ibn El Imam et d'Ibn Erramy. Cette approche offre une perspective unique sur les fondements théoriques de la morphologie urbaine islamique, en mettant en lumière l'importance de la jurisprudence « *Fiqh* » dans l'organisation et la régulation de la ville.

Dans ce paradigme, la ville islamique est façonnée par des processus intégrés où les mécanismes juridiques et réglementaires influencent directement l'organisation des quartiers, des voies et des espaces collectifs, garantissant à la fois cohérence fonctionnelle et adaptation aux besoins sociaux. Ainsi, l'environnement urbain est compris comme le fruit de la synergie entre différents pouvoirs agissants et les composants physiques et sociaux de la ville. Cette synergie repose sur trois préceptes fondamentaux : la propriété, l'utilisation et le contrôle. Ces principes permettent de structurer l'action collective et individuelle au sein de l'espace urbain. Le « système de prise de décision » dans la ville islamique est clairement défini dans la jurisprudence islamique et hiérarchisé selon trois niveaux de pouvoir, connus sous le terme de « *Wilaya* » : le pouvoir public, exercé par les gouvernants ; le pouvoir privé, dévolu aux habitants ; et le pouvoir collectif, assumé par le « *Mouhtassib* » et les juristes. Chacun de ces niveaux correspond à une échelle urbanistique spécifique : macro, micro et méso, permettant de coordonner les décisions à différentes échelles de la ville (Ben Hamouche, 2003). Il est important de noter que, bien que ces pouvoirs puissent parfois apparaître contradictoires, leur action sur l'environnement bâti se déploie simultanément et de manière complémentaire. Cette approche systémique éclaire la ville islamique comme un ensemble vivant, régulé et harmonisé par des mécanismes décisionnels imbriqués, offrant ainsi un paradigme précieux pour comprendre la complexité et la spécificité de l'urbanisme islamique traditionnel.

Ce modèle décisionnel met en évidence une articulation fine entre normes juridiques, pratiques sociales et matérialisation spatiale. La jurisprudence islamique « *Fiqh* » n'intervient pas uniquement comme un corpus de règles abstraites, mais comme un cadre opératoire qui oriente les comportements des acteurs urbains et définit les marges de négociation entre droits individuels et intérêts collectifs. Ainsi, la ville islamique n'est pas le produit d'une planification centralisée, mais celui d'un équilibre dynamique entre contraintes normatives et

initiatives locales. Le pouvoir privé des habitants façonne l'appropriation des parcelles et l'évolution du tissu bâti, tandis que le pouvoir collectif, assuré par le « *Mouhtassib* » et les juristes, garantit la compatibilité des transformations avec l'éthique sociale et les usages partagés. Enfin, le pouvoir public assure la cohésion d'ensemble, notamment dans les infrastructures et les fonctions à portée générale. Cette répartition souple et hiérarchisée permet à la ville islamique de se régénérer en permanence, conciliant continuité des principes fondateurs et adaptabilité face aux transformations socio-économiques.

En somme, l'étude de la ville islamique traditionnelle ne saurait se limiter à un paradigme unique : chaque approche a contribué à éclairer certains aspects, tout en révélant ses propres biais et limites. Cependant, c'est le paradigme du processus et mécanismes juridiques qui l'a défini comme environnement dynamique, tout en insistant sur la diversité interne et les spécificités contextuelles, ouvre des perspectives particulièrement fécondes. En dépassant les généralisations et les oppositions réductrices, il permet de penser la ville islamique comme un système dynamique et évolutif, où interagissent principes sociaux, règles juridiques, logiques économiques et contextes géographiques. Ce cadre offre ainsi la possibilité d'analyser la morphogenèse urbaine selon une lecture systémique et multi-échelles, apte à restituer la richesse et la diversité des expériences urbaines islamiques tout en soulignant les régularités profondes.

4. Processus et mécanismes producteurs de la ville islamique

Après avoir retracé les principaux paradigmes qui ont orienté l'interprétation de la ville islamique traditionnelle, nous pouvons déduire que la ville islamique n'est pas seulement une forme héritée ou un objet de discours. Elle est avant tout le résultat de pratiques sociales, religieuses, économiques, politiques et techniques qui, combinées, ont façonné son organisation spatiale et sa morphologie. La section précédente a mis en évidence que les différentes approches de la ville islamique aboutissent à un paradigme ultime, qui propose de la concevoir non plus comme une forme statique mais comme un environnement dynamique, structuré par des interactions imbriquées et multi-échelles. Ce basculement constitue un changement de paradigme décisif : il marque le passage des approches essentiellement descriptives ou normatives à une lecture processuelle, attentive aux logiques de production et de transformation. Dans cette continuité, il s'agit désormais d'examiner les processus et mécanismes concrets qui ont façonné la morphogenèse de la ville islamique. Loin d'un plan directeur imposé, son organisation est le produit de dynamiques sociales, religieuses, économiques et politiques en constante interaction. C'est par l'entrelacement de ces forces, souvent décentralisées, parfois contradictoires, mais toujours ajustées dans le temps, que s'est constitué un ordre urbain régulé et cohérent.

En effet, considérer la ville à la fois comme un processus et comme un produit constitue un outil efficace d'analyse, d'évaluation et de planification, et se révèle indispensable pour l'étude de la ville islamique. Le processus recouvre l'ensemble des prises de décision en matière de construction, guidées par les valeurs islamiques. On peut mieux en saisir la portée en examinant la dynamique de ces décisions, qui affecte les niveaux de la ville : l'échelle urbaine globale et celle du voisinage (Hakim, 2008). Par conséquent, la ville islamique peut être décrite comme le résultat d'une interaction entre deux systèmes de prise de décision simultanés, encadrés par les règles juridiques islamiques. Ce système de prise de décision, connu sous le terme de « *Wilaya* », est hiérarchisé selon trois niveaux de pouvoir :

les décisions publiques à l'échelle macro (urbaine) représentent l'autorité publique, tandis que les décisions privées à l'échelle micro (quartier) représentent les habitants, et les institutions telles que la « *Hisba* » et les « *Qadis* », jouant un rôle de décisions collectives, servaient de régulateurs entre les deux. Même si les pouvoirs peuvent apparaître contradictoires, ils interviennent simultanément et de manière complémentaire sur l'environnement bâti (Ben Hamouche, 2003). Le schéma dans figure résume ce processus.

Donc pour analyser concrètement la ville islamique, il est nécessaire de considérer les différents niveaux de décision et d'action qui interviennent simultanément dans sa morphogenèse. Ces niveaux se distinguent par l'échelle à laquelle ils opèrent et par la nature des acteurs impliqués, mais restent toujours interdépendants. La section qui suit se structure donc autour de trois niveaux complémentaires : l'échelle macro, correspondant aux décisions des gouvernants ; l'échelle méso, incarnée par les institutions et régulateurs ; et l'échelle micro, portée par les initiatives et pratiques des habitants. Cette approche permet de rendre compte à la fois de la dynamique globale et des mécanismes locaux qui façonnent l'organisation et la cohérence de la ville islamique.

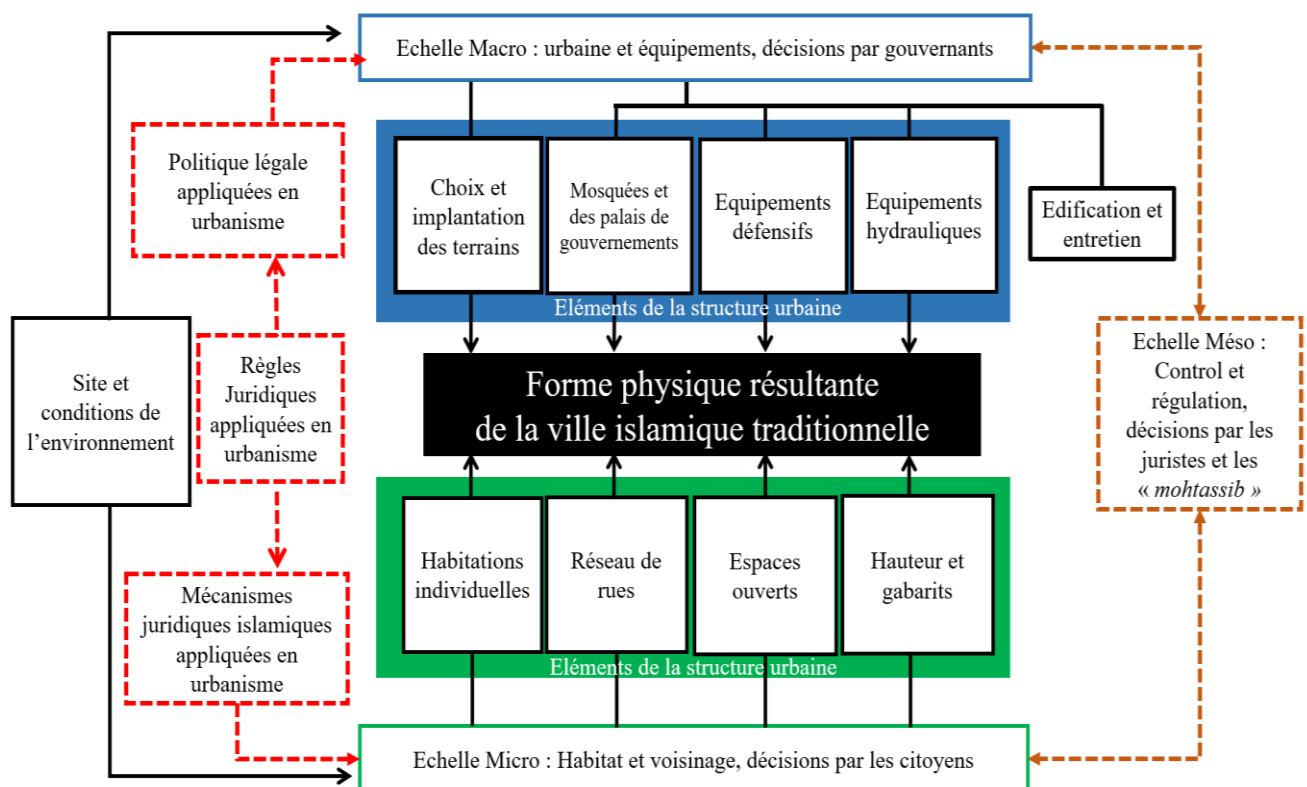


Figure 4.16. Modèle schématique de la formation urbaine de la ville islamique. Source : auteur

4.1. Échelle macro, décisions par gouvernants

Les décisions concernant l'échelle macro au niveau urbain étaient généralement prises par le souverain califat ou un de ses représentants (*wali*) ; elles concernaient la naissance, la croissance et la revitalisation d'une ville, et incluaient l'emplacement de la mosquée principale, la répartition des terres dans les limites prévues de la ville entre divers groupes ethniques, familiaux ou tribaux, ainsi que l'implantation et la configuration des portes et des remparts de la ville. Toutes ces décisions étaient le fruit de choix opérés durant les premières années de la fondation d'une ville (AlSayyad, 1991, p.92-120). Akbar montre que les

décisions à l'échelle macro prises par les califes et les gouverneurs ont joué un rôle déterminant dans la fondation des villes islamiques, tout en laissant leur développement interne propre aux habitants. Au moment de créer les Amsar et les capitales, les autorités fixaient l'emplacement stratégique de l'implantation, souvent en fonction de critères militaires, politiques et économiques, puis décidaient de l'ossature institutionnelle : construction de la mosquée congrégationnelle comme centre religieux et symbolique, édification de la « *Dar al-imara* » (palais du gouverneur) pour incarner l'autorité administrative, et répartition des khitat tribaux afin de garantir une cohésion sociale et militaire. Les exemples de Koufa, Basra, Fostat, et Baghdad incarnaient bien cette logique. Ces décisions fondatrices créaient le canevas initial de la ville, en définissant ses fonctions et sa hiérarchie spatiale (Akbar, 1984, p.160-190).

D'autres décisions fondamentales, intervenant au cours de la croissance de la cité, concernaient la construction de grands édifices publics comme les mosquées et les bains collectifs, ou encore l'emplacement de nouveaux cimetières. Les activités de revitalisation étaient souvent entreprises sous l'impulsion de dirigeants et de gouvernements, au cours de périodes marquées par la sécurité et la prospérité. Les conditions du site et la présence de facteurs déterminants, tels que l'eau ou les particularités naturelles utiles à la défense, influençaient les choix stratégiques et, par conséquent, la forme urbaine qui en résultait. Dans cette perspective Ben Hamouche (1993) souligne que l'administration ottomane (1516-1830) a eu une influence significative sur l'évolution urbaine d'Alger. Les décisions prises par les autorités ottomanes ont déterminé l'organisation de la ville dans diverses dimensions : Extension de la cité et le tracé de nouvelles rues, la construction et l'entretien de bâtiments publics, la gestion des ressources en eau et le développement des différentes infrastructures militaires. La casbah d'Alger a connu des transformations majeures.

De son côté, Hakim (1986, p.103-110), sur son étude de Tunis distingue avec clarté le rôle des macro décisions des souverains qui façonnent la structure globale de la ville islamique. Il confirme que ces décisions instaurent une armature stable et symbolique de la ville, dans laquelle s'inscrit ensuite la multitude des micro décisions des habitants. Ces interventions, décisives, relèvent du pouvoir politique et religieux et traduisent une volonté de planification et de monumentalisation. Elles concernent d'abord la fondation et l'agrandissement des mosquées du vendredi, véritables cœurs urbains qui concentrent fonctions religieuses, éducatives et commerciales, comme en témoigne la mosquée Zaytouna, autour de laquelle se cristallise tout le système des souqs spécialisés. Les souverains complètent cette centralité par la construction de « *Madrasas* », et « *Bimaristans* ». Aussi ils fixent les limites et l'identité de la ville en élevant des murailles et des portes monumentales : Bab el-Bahr, Bab Souika, Bab al-Khadra, qui organisent les flux d'entrée et de sortie et relient les marchés aux axes principaux. Enfin, par l'ouverture ou la prolongation d'artères majeures et l'aménagement de places.

4.2. Echelle micro, décisions par habitants

La dynamique des décisions prises à l'échelle du voisinage, ou échelle micro, était de nature différente des décisions prises à l'échelle du pouvoir central ou échelle macro. Mortada (2003, p. 99–136) souligne que les décisions califales ou gouvernementales, telles que l'implantation d'une mosquée principale, la création du souk ou l'installation d'industries majeures, avaient des conséquences immédiates et visibles sur la structure urbaine. En revanche, les microdécisions issues des habitants comme l'ouverture d'une porte, l'extension d'une maison, l'aménagement d'une ruelle ou d'un cul-de-sac... produisaient des effets indirects et

cumulatifs, perceptibles seulement lorsqu'on considérait l'ensemble du tissu urbain. Ces interventions locales, régies par les règles juridiques « *Fiqh* ». Elles reflétaient des principes tels que la protection de l'intimité « *Hourrma* », le droit de passage « *Haqq al-murour* », les droits de voisinage « *Huqouq al-jiwar* » et la règle du non-dommage « *Darar* ». Ainsi, plus que les grandes orientations politiques, ce sont ces innombrables microdécisions, prises dans le cadre juridique islamique et négociées entre voisins, qui façonnèrent de manière organique et progressive le tissu urbain islamique.

La forme urbaine traditionnelle n'est pas donc le produit d'un projet unique mais l'effet cumulatif de milliers de petites décisions domestiques. Les gestes apparemment mineurs : ajouter une pièce, percer une fenêtre, avancer un encorbellement, fermer une impasse par une porte... agissent comme des opérateurs morphogénétiques : répétés et régulés, ils génèrent et modifient le tissu urbain. Il s'agit d'une logique incrémentale, ce n'est pas une construction instantanée mais un processus long, générationnel, où chaque geste redéfinit localement contraintes et opportunités (Bianca, 2000, p.137-161). Dans ce sens, Azeb (2013) rappelle que les actions des habitants sont guidées par des règles juridiques accumulées au fil du temps, intégrées dans un cadre façonné par la dynamique urbanistique née des interactions quotidiennes des habitants lors de leurs activités de construction. Ces interactions suscitent également des questions et interrogations adressées aux juristes musulmans, qui y répondent en s'appuyant sur les principes du *Fiqh* et sur ses fondements, appelés « *Al-Ossoul* ». Or les questions posées par les musulmans aux spécialistes du *Fiqh* dans le domaine de l'urbanisme procèdent de leur volonté de construire des bâtisses qui soient en harmonie avec leurs principes et leur croyance. Avec le temps, les réponses accumulées ont fini par former une sorte de « cadre légal » qui régit le mouvement urbanistique dans la société et qui engage aussi bien gouvernants que gouvernés.

Selon Hakim (2008), le développement des règles concernant les activités constructives à l'échelle du voisinage devint très tôt un objet de préoccupation pour la science du *Fiqh*. Ce terme arabe désigne la jurisprudence, ou la science du droit religieux en Islam. Les problèmes résultant des activités de construction et des procédures associées étaient considérées par le *Fiqh* comme des problèmes liés aux activités et aux interactions humaines. Un ensemble de règles documentées est identifié :

- Éviter de nuire aux autres et à soi-même.
- Accepter le principe d'interdépendance.
- Respecter la vie privée du domaine personnel d'autrui, en particulier en évitant la création de corridors visuels directs.
- Respecter les droits liés à l'usage originel ou antérieur.
- Respecter le droit de construire en hauteur dans son propre espace aérien.
- Respecter la propriété d'autrui.
- Les voisins ont un droit de préemption sur une parcelle adjacente.

- La largeur minimale des rues publiques traversantes est fixée à sept coudées (pour permettre le passage de deux chameaux lourdement chargés).
- Éviter d'implanter à proximité ou à côté des mosquées les sources d'odeurs désagréables ou d'activités bruyantes.

Il existe plus d'une centaine de principes sur lesquels repose la jurisprudence islamique, parmi eux :

- La base de toute action est la liberté d'agir,
- Stimulée et jugée par les intentions qui la motivent,
- Lesquelles sont limitées par la nécessité d'éviter de causer des dommages à autrui.
- Toutefois, il est parfois nécessaire de tolérer un moindre mal afin d'éviter un mal plus grand.
- Les faits établis antérieurement doivent être pris en compte en s'adaptant à leur existence et à leurs conditions.
- Les coutumes des gens doivent être respectées et suivies,
- Cependant, le temps peut transformer ces coutumes et de nouvelles solutions deviennent alors nécessaires.

Parallèlement, Ben Hamouche (2009) montre que la complexité du tissu urbain musulman n'est pas seulement due à la croissance organique, mais aussi aux règles juridiques islamiques qui encadraient les actions des habitants. Ces règles fonctionnaient comme des « codes endogènes » : elles n'imposaient pas un plan global, mais orientaient les micro décisions de chaque acteur, produisant avec le temps une structure complexe, les règles qui ont un impact sur la morphogenèse urbaine peuvent être résumées comme :

- Le pouvoir juridique, confère aux individus la liberté d'agir sur leurs biens sans autorisation externe, à condition de ne pas nuire aux voisins ou au public. Cette liberté a permis un flot continu de petites actions, qui, cumulées, ont contribué à la formation d'une géométrie fractale dans le tissu urbain.
- Le principe de récupération ou de revivification des terres sans propriétaire autorisait la construction ou l'agriculture sur des terrains vacants, y compris certains espaces inutilisés dans les villes, favorisant des extensions et des projections architecturales variées.
- Les accords entre voisins et le droit de priorité réglaient l'usage mutuel des propriétés et garantissaient que les constructions existantes prévalent sur les nouvelles, imposant la prise en compte de contraintes telles que la confidentialité, l'ombre ou le vent. Ces interactions accumulées ont produit des solutions constructives spécifiques et renforcé la complexité fractale du tissu urbain.
- Le droit de succession en droit islamique répartit les héritages selon le sexe et le lien de parenté, entraînant souvent une fragmentation excessive des biens. Des règles

spécifiques maintenaient la fonctionnalité des éléments indivisibles, et les subdivisions successives ont généré des limites de propriété complexes, contribuant à la densité et à la dimension fractale des villes.

- Le droit de préemption permet aux copropriétaires ou voisins de se substituer à un acheteur externe, favorisant la réunification de parcelles et générant une complexité spatiale supplémentaire, notamment par des connections entre maisons ou passages en surplomb.

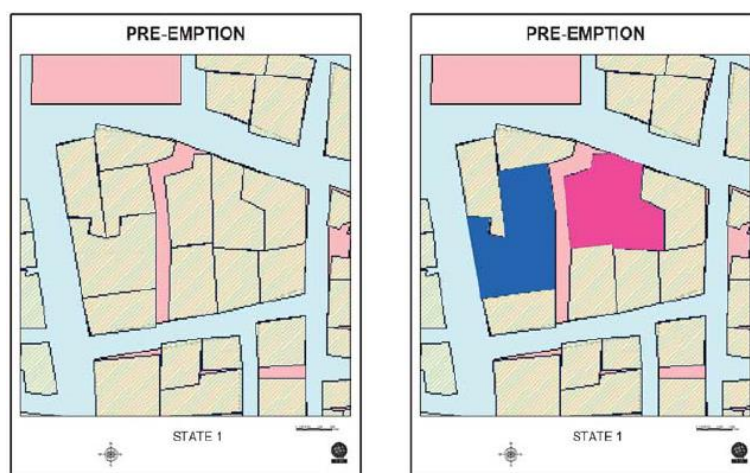


Figure 4.17. Schéma hypothétique expliquant la préemption comme mécanisme à l'échelle micro. Source : Ben Hamouche (2009).

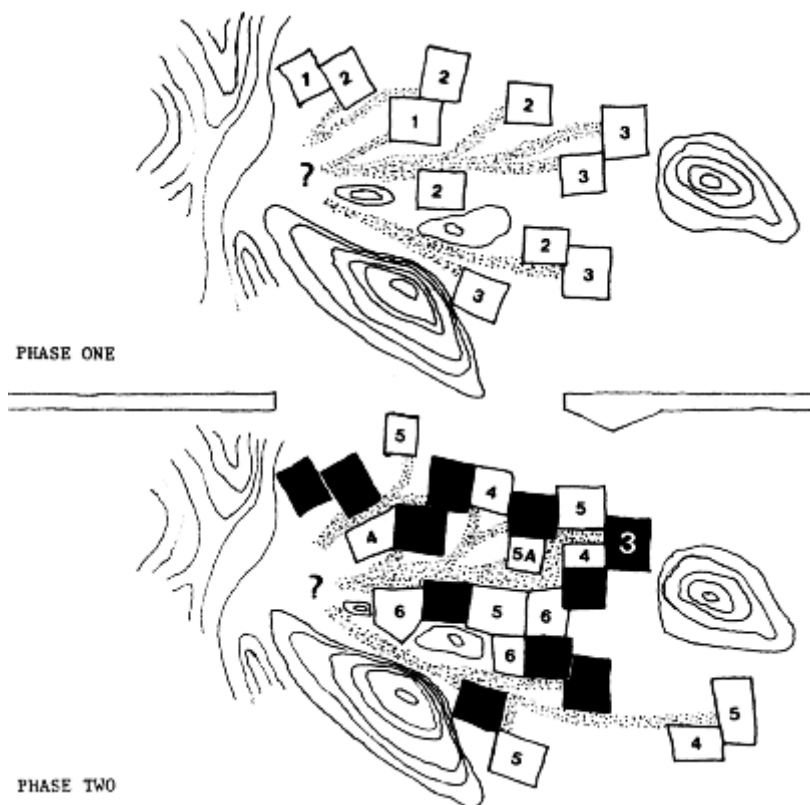


Figure 4.18. Schéma hypothétique expliquant densification selon le principe de revivification. Source : Akbar (1984)

Dans une perspective complémentaire, Akbar (1984, p. 35-45) confirme que ces règles juridiques traduisent une logique de responsabilité partagée. Il commence par souligner le principe central de la « *Massoulyaa* » (responsabilité), qui distribue les droits et devoirs entre individus, familles, communautés et autorités. Cette logique s'exprime dans la définition de la propriété « *Milk* » et du droit d'usage « *Haqq al-intifaa* », où la jouissance privée est toujours limitée par les droits du voisinage et de la collectivité. Les droits de voisinage « *Houqouq al-jiwar* » interdisent les nuisances « *Darar* », comme l'ouverture de fenêtres indiscreètes ou l'obstruction de la lumière et de l'air, et obligent au respect des espaces partagés, façonnant directement la morphologie du bâti et des ruelles. Le droit de préemption « *Haqq al-shufaa* » garantit au voisin une priorité d'achat lors d'une transaction, ce qui favorise la continuité sociale et spatiale des quartiers.

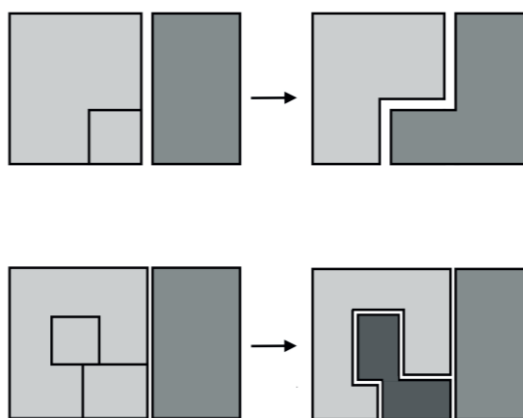


Figure 4.19. Schéma hypothétique expliquant divisions selon droit de succession. Source Akbar (2021)

Conjointement, Al-Hathloul (1981, p. 149-161) met en lumière le rôle du « *Ourf* » (coutume) dans la régulation de l'espace urbain qui peut être présenté comme une institution implicite mais essentielle dans la formation de la ville islamique. Reconnu par le fiqh comme une source de droit secondaire tant qu'il ne contredit pas la loi islamique « *shariiaa* », le Ourf permet d'adapter les règles générales aux réalités locales et aux usages enracinés dans la société. Il concerne en particulier la gestion des espaces semi-publics : ainsi, des ruelles privées « *derb, sikka* » pouvaient être fermées par des portes si le voisinage en convenait, l'entretien d'un passage ou d'un mur mitoyen était assuré collectivement, et certaines pratiques tacites réglaient les droits de passage, de lumière ou d'écoulement des eaux. Le Ourf ne se limite donc pas à des habitudes sociales : il constitue un mécanisme de régulation spatiale, qui, à travers le consensus communautaire, garantit la cohésion entre familles et quartiers. Cette place du Ourf illustre la flexibilité et l'organicité de la ville islamique, capable d'évoluer par ajustements successifs et décisions collectives, sans dépendre exclusivement d'une autorité centrale ni d'un plan imposé.

4.3. Échelle méso, décision par institutions

À l'échelle méso, la ville islamique se structurait autour d'un ensemble d'institutions intermédiaires qui assuraient la régulation collective entre les décisions macro du pouvoir central et les micro décisions des habitants. Dans cette tradition, l'organisation sociale et spatiale reposait sur des instances destinées à préserver l'équilibre communautaire et à traduire concrètement, dans la vie quotidienne, les principes de la shariaa. Le Qadi assurait l'autorité judiciaire, le « *Muhtasib* » régula l'espace public par la « *Hisba* », et le Waqf finançait les équipements collectifs. Ensemble, ces institutions de l'échelle méso traduisaient

les principes religieux en organisation sociale et urbaine, articulant justice, régulation et solidarité communautaire au cœur de la ville islamique. (Mortada, 2003, p. 78-84s). Ainsi ces trois institutions peuvent être décrits comme :

- Qadi, les juristes musulmans ont joué un rôle central dans l'organisation spatiale de la ville islamique traditionnelle. Par leurs « *Fatawa* » et leurs recueils de jurisprudence, ils ont établi un corpus de règles précises concernant le voisinage « *Huqouq al-jiwar* », la protection de l'intimité (*hurma*), la propriété, la préemption et l'usage des voies. Ces règles, issues du *fiqh*, encadraient des aspects concrets : interdiction d'ouvrir des fenêtres donnant sur la maison d'autrui, limitation des encorbellements afin de préserver l'air, la lumière et la vue, contrôle de la hauteur des constructions, gestion des eaux pluviales pour éviter les nuisances, ou encore fixation de la largeur minimale des rues et régulation du marché. Loin d'imposer un plan global, les juristes orientaient l'usage de l'espace en veillant à l'équilibre entre droits individuels et collectifs. Ainsi, la ville islamique est avant tout le produit du droit, plus que celui d'une volonté politique (Al-Hathloul, 1981, p. 149-152 ; Akbar, 1984, p.110-128).
- Hisba, constituait un organe de régulation et d'inspection pratique et quotidien dans l'espace public, dirigé par le « *Muhtasib* ». Sa mission était de garantir l'application concrète des règles du *fiqh* en veillant au bon fonctionnement des marchés (contrôle des poids, mesures, qualité des produits, lutte contre la fraude et la spéculation) et en surveillant l'usage de l'espace urbain (prévention des empiètements sur la voie publique, maintien des largeurs prescrites des rues, fluidité de la circulation). Elle assumait aussi un rôle moral en limitant les nuisances sonores, olfactives ou visuelles qui troublaient la vie collective. Plus qu'une instance normative, la Hisba opérait sur le terrain comme une police des marchés et des mœurs urbaines, garantissant l'équilibre entre droits individuels et intérêt collectif, et faisant de la régulation islamique un dispositif à la fois juridique et opérationnel (Al-Hathloul, 1981, p. 150-152 ; Akbar, 1984, p.200-205).
- Waqf ou Habous, apparaît comme une institution fondamentale de la ville islamique, garantissant la pérennité des équipements collectifs par la donation pieuse de biens (terrains, boutiques, maisons) dont les revenus étaient affectés à l'entretien des infrastructures publiques. Ce mécanisme a financé et maintenu dans le temps mosquées, madrasas, hôpitaux, fontaines, bains, marchés, ponts et caravansérails, assurant ainsi une offre de services stable, indépendante du pouvoir politique et ouverte à toute la communauté. En inscrivant durablement ces équipements dans le tissu urbain, le waqf a façonné la morphologie des villes musulmanes, favorisant l'émergence de centralités multiples et autonomes, et illustrant une organisation spatiale décentralisée portée par la société elle-même, sans recours à une planification centralisée (Al-Hathloul, 1981, p. 172-175 ; Akbar, 1984, p.210-215).

L'analyse des processus et des mécanismes producteurs de la ville islamique montre que sa morphogenèse ne peut être comprise ni comme le produit d'une planification centralisée, ni comme le fruit d'une spontanéité désordonnée. Elle résulte d'un enchevêtrement d'initiatives multi-échelles : les décisions fondatrices des gouvernants à l'échelle macro ont défini une ossature symbolique et politique ; les institutions à l'échelle méso ont assuré la régulation et la pérennité des équilibres sociaux et spatiaux ; enfin, les micro décisions quotidiennes des habitants, encadrées par le *Fiqh*, le *Ourf*, ont façonné de manière incrémentale et adaptative le tissu urbain. La ville islamique se présente ainsi comme

un système complexe et dynamique, où les logiques politiques, sociales, religieuses, juridiques et techniques s'articulent de manière complémentaire, parfois contradictoire mais toujours ajustée dans le temps, produisant un ordre urbain cohérent sans recourir à une planification rigide. Ce modèle processuel et multi-niveaux prépare le terrain pour une lecture de la ville islamique dans la perspective des théories de la complexité, où l'auto organisation et la morphogenèse émergente constituent des clés d'interprétation majeures.

5. La ville islamique comme système complexe

L'analyse des mécanismes de formation et d'organisation de la ville islamique révèle une dynamique fondée sur la pluralité des acteurs, la diversité des logiques d'action et la force des régulations sociales, religieuses et juridiques. Contrairement à une conception planifiée et rigide, sa morphogenèse repose sur des processus incrémentaux, négociés et souvent au fil du temps, qui produisent néanmoins une cohérence spatiale remarquable. Les ajustements successifs, les arbitrages de voisinage et l'encadrement juridique instaurent une régulation permanente, permettant une gouvernance locale souple et décentralisée. Ce système favorise l'auto organisation des formes bâties et l'adaptation aux besoins des habitants : la maison, conçue comme cellule domestique, s'agrège avec d'autres pour former des ensembles résidentiels, puis des quartiers dotés d'équipements collectifs, avant de s'intégrer dans le système urbain global. Cette croissance incrémentale illustre la dynamique cumulative des systèmes complexes, où des interactions locales génèrent une organisation d'ensemble. Les institutions du Waqf, de la Hisba et du Fiqh assurent la cohérence du système en encadrant respectivement la durabilité des équipements collectifs, la régulation du marché et les règles d'usage du sol. Ces dispositifs, loin d'imposer un plan directeur, offrent des cadres normatifs souples qui permettent aux dynamiques locales de se développer tout en maintenant une cohérence d'ensemble, caractéristique essentielle des systèmes autoorganisés.

Ces caractéristiques rapprochent la ville islamique des systèmes complexes tels que définis dans le chapitre 3 : un ensemble hétérogène d'éléments en interaction, produisant un ordre global irréductible aux intentions individuelles. Les récurrences observées dans le réseau viaire ou dans les motifs architecturaux renvoient à une logique fractale, où l'organisation globale se lit dans la répétition et l'emboîtement de structures locales. L'analyse par la théorie des réseaux peut révéler une hiérarchie souple des rues et passages, dont les multiples connexions entre espaces publics et privés assurent robustesse et efficacité. L'adaptation morphologique aux contraintes climatiques et culturelles illustre également cette logique complexe : maisons introverties autour de cours centrales, ruelles étroites générant ombre et ventilation, marchés adossés aux pôles religieux et politiques. Ces choix locaux, apparemment pragmatiques, produisent des invariants morphologiques du Maghreb au Machrek et démontrent la résilience des villes islamiques en tant que systèmes autoorganisés.

Simultanément, des outils des théories de la complexité, tels que les automates cellulaires et la modélisation à base d'agents (ABM), permettent de formaliser les logiques micro-locales à l'origine de la morphogenèse de la médina. En simulant des interactions simples entre voisins : ouverture d'une porte, agrandissement d'une maison, création d'une ruelle pour relier deux ensembles bâtis... , ils montrent comment des décisions individuelles, décentralisées et apparemment légères, peuvent produire à long terme des formes urbaines cohérentes. Ces modèles illustrent concrètement le principe d'émergence : l'ordre spatial de la ville islamique ne découle pas d'un plan préalable, mais de régulations collectives, de négociations sociales et d'ajustements itératifs qui, cumulés, génèrent une organisation d'ensemble. Cette lecture gagne en profondeur lorsqu'elle est croisée avec la géométrie

fractale, qui éclaire la structure hiérarchique et autosimilaire de la ville islamique : la maison constitue une unité de base qui se répète et s'agrége en ensembles résidentiels, eux-mêmes intégrés dans des quartiers, avant de former la ville entière. À chaque échelle, on observe des régularités morphologiques qui témoignent d'une logique fractale, où la cohérence globale résulte de la répétition et de l'emboîtement de structures locales.

D'un autre côté, les apports de la théorie des réseaux permettent de mieux comprendre le fonctionnement du système viaire et la structuration des centralités. La hiérarchisation souple des rues, allant des ruelles privées aux artères principales, révèle une organisation où les flux de circulation, les espaces publics et les lieux de sociabilité sont intimement liés. La centralité de la mosquée et du souk, véritables nœuds du réseau, assure l'articulation entre dimensions religieuses, sociales et économiques, tout en garantissant la robustesse et l'efficacité des connexions urbaines. Pris ensemble, ces modèles, automates cellulaires, fractales et réseaux offrent un cadre conceptuel et méthodologique pour saisir la médina comme un système autoorganisé. Ils montrent comment la combinaison de décisions locales, de contraintes environnementales et de régulations sociales produit une organisation urbaine d'une grande complexité, à la fois cohérente, adaptable et résiliente.

La médina apparaît ainsi comme un organisme vivant, évolutif, où la régulation endogène tient lieu de planification. De ce point de vue, la ville islamique peut être interprétée comme un système complexe adaptatif, où l'organisation naît d'une multitude d'interactions locales et de mécanismes de régulation collectifs, plutôt que d'une autorité centralisée et planificatrice. En mobilisant les outils de la complexité, il devient possible de dépasser une lecture strictement historique, géographique ou orientaliste, et d'inscrire la médina dans une perspective plus générale de compréhension des systèmes urbains. Une telle approche ne se limite pas à enrichir l'analyse scientifique : elle engage un véritable changement de paradigme. Considérer la ville islamique comme un système complexe revient à renverser les représentations dominantes qui la réduisaient soit à un chaos désordonné, soit à un modèle figé d'organisation « traditionnelle ». C'est reconnaître dans son évolution, son adaptabilité et sa capacité d'auto organisation les signes d'une véritable intelligence collective urbaine. Cette relecture éclaire non seulement la compréhension du passé, mais nourrit également les réflexions contemporaines sur la durabilité, la résilience et la gouvernance des villes. La ville islamique traditionnelle apparaît ainsi comme une morphogenèse urbaine complexe, produite par la combinaison d'agrégaions locales, de régulations sociales, d'adaptations contextuelles et de dynamiques émergentes. Loin d'un modèle statique ou d'un désordre irrationnel, elle se révèle comme un système adaptatif et autoorganisé, dont l'analyse gagne à mobiliser les théories de la complexité et leurs outils de formalisation.

. Conclusion

L'étude de la ville islamique traditionnelle révèle un objet complexe, à la fois chargé de mythes et ancré dans des réalités historiques et morphologiques multiples. Sa lecture ne peut se réduire ni à l'image figée de la médina patrimoniale, ni aux généralisations orientalistes qui la décrivaient comme chaotique et irrationnelle. L'examen des composantes fondamentales, maison à cour, mosquée, souk, quartiers et réseau viaire, met en évidence des logiques d'organisation cohérentes, profondément enracinées dans les normes religieuses, sociales et économiques, mais aussi dans des contraintes climatiques et matérielles. Loin d'un modèle unique et universel, la morphogenèse urbaine islamique résulte d'une pluralité de processus : fondations ex nihilo (Amsar, Ribats, capitales princières) et adaptations de villes héritées (Damas, Alep, Alexandrie). Ces trajectoires diverses ont produit des formes reconnaissables

mais toujours différenciées, révélant des invariants structurants (binôme mosquée–souk, hiérarchie viaire, introversion résidentielle) articulés à des variations locales.

Les paradigmes successifs, récits de voyageurs, orientalisme, marxisme, lectures fonctionnalistes, ont chacun contribué à construire une vision partielle de la ville islamique. Si l'orientalisme a longtemps fixé le débat dans une opposition entre chaos oriental et rationalité gréco-romaine, les approches critique, socio-économiques et historiques ont élargi la compréhension en insistant sur les rapports de production et les dynamiques communautaires. Cependant, aucune de ces approches ne rend pleinement compte du caractère autoorganisé, adaptatif et évolutif de ces villes. Ce constat ouvre la voie à une relecture épistémologique : la ville islamique doit être comprise comme un système complexe, produit de dynamiques multiples et interdépendantes. Sa morphogenèse illustre des principes d'émergence, d'auto-organisation et d'adaptation incrémentale, qui la rapprochent des modèles étudiés dans les théories de la complexité. Ce cadre permettra, dans les chapitres suivants, de dépasser l'accumulation descriptive et les grilles explicatives partielles, pour explorer de manière plus systématique la ville islamique à travers des outils tels que les fractales et la théorie des réseaux.

. Notes et références bibliographiques

Akbar, J. A. (1994). Is there an Islamic city? *Journal of Architecture and Planning*, 6, 3–28.

https://cap.ksu.edu.sa/ar/JAP_vol6.

Jeuge-Maynard, I. (Éd.). (2010). *Le Petit Larousse illustré 2010*. Paris : Larousse.

Rey, A. (Éd.). (2009). *Le Petit Robert de la langue française 2009* (édition revue et corrigée). Paris : Dictionnaires Le Robert.

Lévy, J., et Lussault, M. (dir.). (2013). *Dictionnaire de géographie et de l'espace des sociétés*. Paris : Belin.

Merlin, P., et Choay, F. (Éds.). (1996). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement* (2^e éd.). Paris : Presses Universitaires de France - PUF.

Antoniou, J. (1981). *Islamic cities and conservation*. Paris : The Unesco Press.

Mahdy, H. (2017). *Approaches to the conservation of Islamic cities: The case of Cairo*. Sharjah : ICCROM-ATHAR Regional Conservation Centre.

Bianca, S. (2000). *Urban form in the Arab world: Past and present*. London: Thames & Hudson.

Petruccioli, A. (2008). House and fabric in the Islamic Mediterranean city. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The city in the Islamic world* (Vol. 2, pp. 851–876). Leiden: Brill.

Berardi, R. (2008). The spatial organization of Tunis Medina and other Arab-Muslim cities in North Africa and the Near East. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The city in the Islamic world* (Vol. 1, pp. 269–294). Leiden: Brill.

Hakim, B. S. (1994). The 'Urf and its role in diversifying the architecture of traditional Islamic cities. *Journal of Architectural and Planning Research*, 11(4), 108–127. JSTOR. <https://www.jstor.org/stable/43029115>.

Al-Hathloul, S. (1981). *Tradition, continuity and change in the physical environment: The Arab-Muslim city*. [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].

- Raydan, D., Ratti, C., et Steemers, K. (2004). Courtyards: a bioclimatic form?. In B. Edwards, M. Sibley, M. Hakmi, & P. Land (Eds.), *Courtyard housing: Past, present & future* (pp. 163–184). E-Taylor & Francis eBook.
- Sibley, M. (2004). Living traditions: The courtyard house as a model for contemporary domestic architecture. In B. Edwards, M. Sibley, M. Hakmi, & P. Land (Eds.), *Courtyard housing: Past, present & future* (pp. 143–162). E-Taylor & Francis eBook.
- Petrucchioli, A. (2004). The courtyard houses of north African medinas, past, present and future. In B. Edwards, M. Sibley, M. Hakmi & P. Land (Éds.), *Courtyard Housing: Past, Present & Future* (pp. 11–26). E-Taylor & Francis eBook.
- Raymond, A. (1985). *Grandes villes arabes à l'époque ottomane*. Paris : Sindbad. (Collection Bibliothèque arabe).
- Mortada, H. (2003). *Traditional Islamic principles of the built environment* [eBook edition]. Routledge.
- Denoix, S. (2008). Founded cities of the Arab world from the seventh to the eleventh centuries. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The city in the Islamic world* (Vol. 1, pp. 115–139). Leiden: Brill.
- Von Grunebaum, G. E. (1955/2008). The Structure of the Muslim Town. In G. E. von Grunebaum (Ed.), *Islam: Essays on the Nature and Growth of a Cultural Tradition* (pp. 141–158). Abingdon: Routledge.
- Hakim, B. S. (2008). Law and the city. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The city in the Islamic world* (Vol. 1, pp. 71–92). Leiden: Brill.
- Raymond, A. (2008). The Spatial Organization of the City. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The City in the Islamic World* (Vol. 1, pp. 47–70). Leiden: Brill.
- Mostafa, S. L. (1981). *Al Madina al munawwara: Urban development and architectural heritage*. Beyrouth : Dar al-Nahda al-Arabia.
- Akbar, J. A. (1984). *Responsibility and the traditional Muslim built environment* [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].
- Alsayyad, N. (1991). *Cities and caliphs: On the genesis of Arab Muslim urbanism*. New York, NY: Greenwood Press.
- Kuhn, T. S. (1972). *La structure des révolutions scientifiques* (L. Meyer, Trad.). Paris : Flammarion. (Ouvrage original publié en 1962).
- Haneda, M. (2013). *Islamic urban studies: Historical review and perspectives* [eBook edition]. London: Routledge. (Ouvrage original publié en 1994).
- Cresti, F. (2005). La population d'Alger et son évolution durant l'époque ottomane : Un état des connaissances controversé. *Arabica*, 52(4), 457–495. <https://doi.org/10.1163/157005805774320240>.
- Said, E. W. (1980). *L'orientalisme*. Paris : Éditions du Seuil.
- Neglia, G. A. (2008). Some historiographical notes on the Islamic city with particular reference to the visual representation of the built city. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The City in the Islamic World* (Vol. 1, pp. 1–46). Leiden: Brill. <https://doi.org/10.1163/ej.9789004162402.i-1500.6>.
- Al-Lahham, A. (2004). Orientalism in the readings of Muslim built environments. *Journal of Architecture and Planning*, 16, 95–174. https://cap.ksu.edu.sa/ar/JAP_vol16.

- Abu-Lughod, J. L. (1987). The Islamic city: Historic myth, Islamic essence, and contemporary relevance. *International Journal of Middle East Studies*, 19(2), 155–176. <https://doi.org/10.1017/S0020743800031822>.
- Raymond, A. (1994). Islamic city, Arab city: Orientalist myths and recent views. *British Journal of Middle Eastern Studies*, 21(1), 3–18. <https://www.jstor.org/stable/195564>.
- Allain, R. (2004). *Morphologie urbaine : Géographie, aménagement et architecture de la ville* (Coll. U Géographie). Paris : Armand Colin.
- Massignon, L. (1935). Explication du plan de Kufa (Irak). In P. Jouguet (Dir.), *Mélanges Maspero III: Orient islamique* (pp. 337–360). Le Caire: Mémoires de l'Institut français d'archéologie orientale.
- Cahen, C. (1955). L'Histoire économique et sociale de l'Orient musulman médiéval. *Studia Islamica* (No. 3), 93–115. <https://doi.org/10.2307/1595104>.
- Lapidus, I. M. (1967). *Muslim Cities in the Later Middle Ages*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Petrucchioli, A. (2002). New methods of reading the urban fabric of the Islamicized Mediterranean. *Built Environment*, 28(3), 202–216. <https://www.jstor.org/stable/23288452>.
- Hourani, A. H., & Stern, S. M. (Eds.). (1970). *The Islamic city: A colloquium* (Papers on Islamic History, 1). Oxford : University of Oxford, Near Eastern Group.
- Ilbert, R. (1982). La ville islamique : Réalité et abstraction. *Les Cahiers de la recherche architecturale*, 10–11, 6–14.
- Guichard, P. (1998). Les villes d'al-Andalus et de l'Occident musulman aux premiers siècles de leur histoire : Une hypothèse récente. In *Genèse de la ville islamique en al-Andalus et au Maghreb occidental* (pp. 37–52). Madrid : Casa de Velázquez.
- Djaït, H. (1986). *Al-Kūfa : Naissance de la ville islamique*. Paris : Maisonneuve et Larose.
- Kuban, D. (1985). *Muslim religious architecture* (Iconography of Religions, Section 22, Islam, No. 1). Leiden: Brill Academic Pub.
- Rudofsky, B. (1964). *Architecture without architects: An introduction to nonpedigreed architecture*. New York, NY: Museum of Modern Art.
- Rapoport, A. (1969). *House form and culture*. London : Pearson.
- BenHamouche, M. (2003). Decision-making system and urban geometry in traditional Muslim cities: The case of Algiers 1516–1830. *Journal of Architectural and Planning Research*, 20(4), 307–322. <https://www.jstor.org/stable/43030669>.
- Hakim, B. S. (1986). *Arabic Islamic cities: Building and planning principles*. London: Routledge.
- Brunschvig, R. (1947). Urbanisme médiéval et droit musulman. *Revue des Études Islamiques*, 15, 125-155.
- Azab, K. (2013). *Fiqh al-oumran: Al-imara wal moujtamae wal dawla fi al-hadara al-islamia*. Le Caire: Egyptian-Lebanese Publishing House.
- Ben Hamouche, M. (2009). Can chaos theory explain complexity in urban fabric? Applications in traditional Muslim settlements. In K. Williams (Ed.), *Nexus network journal* (Vol. 11, No. 2). Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8976-5_6.

Chapitre 5 : Rue et réseau viaire, éléments structurants et supports méthodologiques

« Rue et trottoirs sont les organes vitaux de la ville. »

Jane Jacobs

« Les rues de la ville ne sont pas des lieux de passage mais des fils tendus entre le passé et l'avenir. »

Italo Calvino

. Introduction

Bien plus qu'un simple tracé de pierre et de béton, la rue constitue le miroir des sociétés urbaines. Elle est à la fois un élément structurant et un révélateur des dynamiques sociales, culturelles et spatiales. Support de mobilité, scène de la vie quotidienne et marqueur de l'urbanité, elle organise le parcellaire, l'îlot et le quartier, orientant ainsi la structuration de l'espace urbain. Qu'il s'agisse de réseaux orthogonaux, radiaux ou organiques, le réseau viaire façonne l'armature de la ville et traduit un processus de morphogenèse où s'articulent contraintes physiques, besoins sociaux et logiques culturelles. Dans les études urbaines, la rue et le réseau viaire sont donc analysés comme structures morphologiques fondamentales, mais aussi comme indicateurs des dynamiques sociales et économiques. Les approches typologiques ont cherché à classer leurs formes, tandis que d'autres lectures ont mis en lumière leur rôle fonctionnel et symbolique.

Cependant, l'application de cette vision classique se complexifie lorsqu'on observe des configurations urbaines spécifiques, comme celles des villes islamiques traditionnelles. À première vue irrégulier et compact, leur réseau viaire révèle en réalité une logique d'auto-organisation où se combinent exigences sociales, contraintes spatiales et régulations communautaires. Loin d'être chaotique, il exprime une hiérarchie claire entre artères principales, ruelles secondaires et impasses, ainsi qu'une articulation subtile entre espaces publics, semi-publics et privés. La rue apparaît alors comme prolongement de la maison, espace de sociabilité et vecteur d'intégration des fonctions religieuses, commerciales et résidentielles. Ce réseau constitue le produit d'une morphogenèse incrémentale, fondée sur des décisions locales, générant un ordre émergent et une cohérence globale. Cette complexité confère à la rue et au réseau viaire une double valeur dans le cadre de cette recherche. D'un côté, ils sont étudiés comme éléments structurants de la forme urbaine, conditionnant l'organisation spatiale et reflétant les dynamiques sociales. De l'autre, ils offrent un terrain méthodologique privilégié pour l'analyse scientifique de la morphogenèse urbaine, car leur hiérarchie, leur autosimilarité et leur irrégularité organisée conviennent à une lecture dans le paradigme de la complexité.

Ainsi, ce chapitre se propose de montrer comment la rue et le réseau viaire, loin de constituer une simple infrastructure, représentent à la fois le socle morphologique de la ville en général et, dans le cas spécifique de la ville islamique, un objet d'analyse particulièrement adapté aux outils de la complexité. L'examen des apports de l'histoire, de la typologie et des études urbaines ouvre la voie à une lecture fractale et en réseau, préparant la transition vers les chapitres suivants consacrés aux modèles fractals (chapitre 6) et à la théorie des réseaux (chapitre 7).

1. Rue et réseau viaire, éléments morphologiques fondamentaux

Hachi (2020 p. 21-28) définit la rue comme objet d'urbanisme et de géographie, à la fois espace de circulation et de sociabilité. Son organisation conditionne l'image et la forme de la ville en jouant le rôle central dans la structuration urbaine. Le réseau viaire, quant à lui, est défini comme l'ensemble structuré de tronçons de rue et de leurs intersections. Il est le support du mouvement des hommes et des véhicules dans l'espace urbain, autrement dit le

support de la circulation. Aussi, la morphologie du réseau viaire est la trame sur laquelle reposent les autres dimensions de la ville. Parallèlement, Caliskan (2013, p.132-149) définit la rue comme l'élément fondamental qui structure le tissu urbain, comparable au squelette d'un organisme, puisqu'elle relie les différentes composantes de la forme urbaine et les rend lisibles. Dans cette perspective, la rue n'est pas seulement un espace de circulation mais aussi un cadre qui organise les rapports entre espace public et privé, le bloc urbain n'étant qu'un produit dérivé du tracé viaire. Le réseau viaire est ainsi décrit comme un système complexe de nœuds (intersections) et de liens (axes), qui fonctionne à la fois comme structure de connexion et comme trame de séparation découpant le sol en parcelles. Ce réseau peut être mesuré et analysé à travers des éléments constitutifs tels que les lignes de rue, les segments, les nœuds et les cellules (blocs), en mobilisant des indicateurs morphologiques tels que la continuité, la connectivité, la profondeur, la rectilinéarité, la sinuosité et la densité.

De son côté, Marshall (2005, p. 6-15) définit la rue comme un élément fondamental de la ville, qui ne peut être réduite à une simple route ou infrastructure de circulation. Elle est au contraire une entité hybride réunissant trois dimensions indissociables : un canal de circulation (vue de l'ingénieur des transports), un espace public (vue de l'urbaniste et du paysagiste) et un front bâti (vue de l'architecte et du designer urbain). Ainsi, la rue a toujours constitué à la fois un axe de mobilité, un lieu de sociabilité et un cadre bâti. Or, la modernité fonctionnaliste a démembré cette unité en séparant les fonctions, les routes étant conçues pour le trafic rapide, les espaces publics relégués ailleurs, et les bâtiments isolés de leurs fronts de rue. Conjointement, il définit le réseau viaire comme l'assemblage des rues et routes constituant une trame continue qui assure à la fois la circulation et l'accessibilité urbaine. Ce réseau peut être saisi selon plusieurs registres : géométrique (forme visible de la grille, du schéma radial, organique, etc.), topologique (relations de connectivité entre les rues, étudiées par la théorie des graphes) et hiérarchique (différents niveaux d'importance attribués aux voies : autoroutes, artères, collectrices, locales). Le réseau viaire n'est pas un simple « usage du sol » parmi d'autres, mais le tissu conjonctif qui relie l'ensemble des parcelles bâties et des fonctions urbaines, comparable à une mer d'espace public au sein de laquelle les îlots privés apparaissent comme des archipels.

1.1. Morphologie urbaine, écoles et cadres d'interprétation

La reconnaissance de la rue et du réseau viaire comme éléments morphologiques fondamentaux invite à interroger les approches théoriques qui ont tenté de formaliser l'étude de la forme urbaine. C'est dans ce cadre que se situent les principales écoles de la morphologie urbaine, dont les apports permettent de mieux comprendre la structuration et l'évolution des tissus urbains. Dans cette perspective, Fusco (2018, p. 80) considère la rue et le réseau viaire comme des composantes essentielles de la morphologie urbaine. À côté du parcellaire et du bâti, ils constituent un registre d'analyse incontournable de la forme urbaine. Ainsi, l'étude de la rue ne se limite pas à son rôle fonctionnel mais s'étend à sa dimension structurelle, en tant qu'espace vécu et organisé par les acteurs urbains. Par ailleurs et dans une approche détaillée, Oliveira (2016, p. 92–117) en illustrant les traditions et écoles de morphologie urbaine, il définit la rue est à la fois un support spatial, un cadre social et un élément structurel permanent de la morphologie urbaine. Il distingue ainsi :

- L'école anglaise, la rue comme permanence historique. Dans la tradition anglaise, initiée par Michael Robert Conzen, la rue est considérée comme l'un des trois éléments fondamentaux du plan urbain avec les parcelles et les bâtiments. Leur approche de la « *town-plan analysis* » met en évidence la stabilité et la

permanence du réseau de rues dans l'évolution des villes. Les rues structurent les « *plan units* » et servent de repères diachroniques. Avec la notion de « *fringe belts* », Conzen montre que les rues marquent durablement la morphologie, devenant de véritables indicateurs historiques de la croissance urbaine. Cette école connaîtra des prolongements apportés par d'autres chercheurs tel que Jeremy Whitehand qui souligne l'importance de la dimension historique et évolutive de la forme urbaine et de Anne Moudon, qui a positionné la morphologie urbaine comme un champ interdisciplinaire combinant géographie, urbanisme et architecture.

- L'école italienne, typologie et processus historique. Pour l'école italienne, portée par Saverio Muratori, Gianfranco Caniggia, et Carlo Aymonino. La rue n'est pas un simple espace vide mais une structure vivante, en relation dialectique avec l'îlot et les types bâtis. Elle reflète un héritage culturel et évolue conjointement avec les formes architecturales. Muratori analyse par exemple la rue comme un élément porteur de mémoire historique dans les tissus urbains de Rome ou de Venise. Cette école critique l'urbanisme moderne, qui a affaibli la rue au profit des grands ensembles, et défend l'idée du réseau viaire comme tissu organique garant de la continuité morphologique et sociale.
- L'école française, la rue comme unité sociale et critique du modernisme. En France, les travaux de Philippe Panerai, Jean Castex, Jean-Charles Depaule affirment la centralité de la rue comme unité sociale et fonctionnelle. La rue structure l'îlot, organise les façades et soutient la sociabilité. La disparition de la rue dans les projets modernistes a produit une perte de repères et de cohérence. Pour cette école, le réseau viaire est l'ossature de la lisibilité urbaine, garantissant continuité et orientation. Elle se distingue par une approche à la fois descriptive et normative, plaidant pour la réhabilitation de la rue au cœur du projet urbain.
- L'école américaine, la rue comme trame perceptive et cognitive. Avec Kevin Lynch, cette école fait de la rue « *paths* » l'élément le plus fondamental de l'image urbaine. Les rues constituent le support principal de l'expérience urbaine et de la mémoire collective. Le réseau viaire n'est pas seulement une infrastructure matérielle : il devient une armature cognitive, garantissant la lisibilité et l'orientation. Cette approche introduit une dimension phénoménologique, en faisant de la rue un espace vécu et perçu, au-delà de sa matérialité.

Les approches classiques de la morphologie urbaine ont joué un rôle central dans la compréhension de la forme des villes. Elles ont permis d'analyser et de systématiser les structures bâties, d'identifier les types d'îlots, et de décrire les principes de composition qui sous-tendent l'organisation des espaces urbains. Ces contributions restent précieuses, car elles offrent un cadre analytique structuré pour observer et comparer les villes à différentes échelles. Cependant, ces approches présentent également des limites importantes. En se focalisant principalement sur les formes physiques et la géométrie des îlots, elles tendent à négliger les dimensions dynamiques et relationnelles qui gouvernent l'organisation urbaine. Ces insuffisances deviennent particulièrement visibles dans le contexte des villes islamiques traditionnelles. Dans ces villes, la morphogenèse n'obéit pas à un plan directeur ou à des modèles normatifs préétablis. Elle résulte plutôt d'une accumulation de processus locaux et incrémentaux, d'ajustements successifs et de pratiques sociales évolutives, qui produisent des formes complexes et des réseaux hiérarchisés sans intervention centralisée. La lecture de la

ville à travers les seuls critères classiques de la morphologie bâtie ne permet donc pas de saisir pleinement cette logique émergente.

Pour dépasser ces limites et enrichir la compréhension de la morphologie urbaine, il est nécessaire d'articuler les acquis de la tradition morphologique avec des outils analytiques plus pertinents comme ceux issus de la science des systèmes complexes. Dans ce sens, La théorie des graphes, les mesures de connectivité et la complexité fractale offrent des perspectives nouvelles pour étudier les réseaux viaires et leurs interactions avec le bâti. En combinant ces approches, il devient possible de construire une morphologie élargie, capable de représenter simultanément les structures bâties, les réseaux de circulation et les dynamiques spatiales émergentes. Cette démarche ouvre ainsi la voie à une analyse plus complète et plus fine de la morphogenèse urbaine, en particulier dans les contextes où l'urbanisation obéit à des logiques complexes et évolutives, comme c'est le cas des villes islamiques traditionnelles.

1.2. Approche de la morphogenèse progressive

La compréhension du réseau viaire et de la rue ne se limite pas à l'observation de leur forme finale ; elle implique également l'étude des processus par lesquels ces structures se construisent et évoluent. Comme expliqué dans le chapitre 2, l'approche de la morphogenèse met en lumière la manière dont la ville se développe par accumulation de décisions locales, ajustements successifs et interactions entre acteurs. Dans ce sens, Fusco (2018, p. 78) rappelle que la morphologie urbaine doit être envisagée à la fois en termes de formes et de genèse, renvoyant à une morphogenèse progressive des tissus urbains. La rue, unité morphologique élémentaire, s'inscrit dans un processus historique et évolutif qui façonne progressivement la structure du tissu urbain. Selon lui, la morphologie urbaine doit intégrer la complexité des tissus urbains, mettant en évidence l'interdépendance entre la trame urbaine, l'organisation des flux et la structuration des centralités. Cette approche souligne que la ville se construit comme un système complexe, où formes, usages et dynamique historique s'entrelacent dans un processus de morphogenèse continue.

De son côté, Marshall (2005, p. 114-115) insiste sur le fait que les rues et les réseaux viaires ne sont pas des objets fixes, mais le résultat d'une formation graduelle et cumulative. Il explique que les rues se constituent par agrégation progressive de liens et de segments, qui se combinent en itinéraires plus continus et reconnaissables. De la même manière, les notions comme composition, configuration et constitution traduisent un passage par étapes : d'abord la géométrie matérielle, ensuite la topologie des connexions, et enfin l'émergence d'une hiérarchie structurée. Il précise que les règles de formation des rues peuvent évoluer par changements progressifs, ajoutés incrémentalement à une structure de base, produisant ainsi une diversité de patrons urbains. Les réseaux urbains réels sont le résultat de processus gradualistes et progressifs, produits par une suite de décisions locales et d'adaptations pratiques au fil du temps, plutôt que par des plans figés d'avance. Dans la même perspective, Caliskan (2013, p.142-149) développe l'idée que la rue est le résultat d'une morphogenèse progressive, où chaque transformation locale s'inscrit dans une continuité d'ensemble. La morphologie urbaine n'est donc pas conçue comme le fruit d'une création ponctuelle, mais comme un processus d'accumulation et de recomposition. Dans cette perspective, les rues émergent par ajustements successifs et par l'adaptation des règles locales de construction. Cette approche met en évidence que les motifs urbains, loin d'être imposés, sont des produits collectifs et évolutifs, façonnés par des pratiques sociales, économiques et techniques. Pour éclairer ce processus, il mobilise une analogie génétique : les formes urbaines fonctionnent

comme des codes qui assurent à la fois la transmission des invariants et l'adaptation aux contextes. Ainsi, le réseau viaire peut être vu comme un code morphologique qui se perpétue et se transforme dans le temps. Cette perspective morphogénétique rejoint les théories de la complexité et de l'émergence appliquées à l'urbanisme. En conséquence, la rue est abordée non seulement comme une infrastructure de mobilité, mais aussi comme un produit historique et morphologique, qui révèle la logique interne de la formation des tissus urbains.

La morphogenèse progressive du réseau viaire considère la rue non pas comme une simple infrastructure, mais comme le résultat d'un processus évolutif et incrémental, où chaque tronçon et chaque intersection émerge d'interactions locales, de besoins sociaux et de contraintes spatiales. Comme montré dans le chapitre 2, la morphogenèse urbaine se construit par accumulation de décisions successives, produisant des formes urbaines cohérentes. Dans le cas spécifique des villes islamiques traditionnelles, cette approche révèle que l'irrégularité apparente des rues et des ruelles est en réalité le reflet d'une organisation hiérarchisée et fonctionnelle. Le réseau viaire se structure selon une hiérarchie claire : artères principales, ruelles secondaires et impasses s'articulent pour assurer à la fois circulation, accessibilité et sociabilité. Chaque rue agit comme prolongement de l'habitat, espace de rencontre et vecteur d'intégration des fonctions religieuses, commerciales et résidentielles. Ce processus met en évidence l'auto-organisation, où les ajustements locaux produisent un ordre émergent et une cohérence globale, confirmant les principes exposés dans le chapitre 3 sur les théories de la complexité. Le réseau viaire devient ainsi un objet privilégié d'étude de la morphogenèse progressive, illustrant comment des structures locales peuvent générer une organisation spatiale globale sans plan directeur centralisé.

2. Rue et réseau viaire en études urbaines

Après avoir présenté la rue et le réseau viaire comme éléments morphologiques fondamentaux, structurant la ville et reflétant ses dynamiques sociales et fonctionnelles, il est essentiel de s'intéresser à la manière dont ces structures ont été étudiées et analysées en études urbaines. Une voie n'est pas seulement un objet physique : elle constitue également un outil de conception, de représentation et de planification urbaine. Le réseau viaire, regroupant rues, places, ponts et autres espaces de circulation, a ainsi été au centre des préoccupations des urbanistes, architectes, ingénieurs et philosophes, qui ont élaboré des visions et des préconisations orientant la morphologie, l'aménagement et la fonction des villes (Merlin & Choay, 1996). Ces choix s'inscrivent dans les différentes manières de voir et d'organiser la ville, qui reflètent à la fois des convictions techniques, éthiques et politiques (Choay, 1965). Dans cette logique, il est utile de distinguer les théoriciens, qui diffusent leurs conceptions à travers des écrits, et les praticiens, qui réalisent des projets concrets. Ainsi, l'étude du réseau viaire en études complète l'approche morphologique précédente en montrant que la forme des rues résulte non seulement de processus locaux et évolutifs, mais également de choix planificateurs et de visions globales de la ville.

2.1. Le réseau viaire comme image de la ville

Le réseau viaire, souvent perçu comme le vide de la ville, constitue un vecteur essentiel de son image et de sa représentation. Hachi (2020, p. 33-45) confirme qu'à travers l'histoire, urbanistes et architectes ont conçu les voies urbaines non seulement comme des outils de circulation, mais aussi comme des instruments capables de susciter chez les habitants et visiteurs des sentiments variés : ordre, beauté, nostalgie ou bien-être. Dès l'Antiquité, la

régularité du plan urbain reflète une volonté d'ordre et de rationalité. Des villes comme Haradum (Mésopotamie, XVII^e siècle av. J.-C.) ou Milet (Grèce antique) montrent des rues droites, des places centrales et des quadrilatères de remparts. Ces réseaux viaires géométriques traduisent à la fois l'organisation politique et l'efficacité fonctionnelle. À la Renaissance, l'adoption de la perspective transforme la conception urbaine : les rues deviennent des vitrines de la ville, larges, rectilignes, et composées selon des motifs géométriques (grilles ou étoiles). Alberti (1485) et Palladio (1570) considèrent la voie non seulement comme utilitaire, mais aussi comme un espace esthétique et organisé pour le déplacement. Des plans urbains comme celui de Rome sous le pape Sixte Quint incarnent cette dimension symbolique et visuelle, associant ordre et pouvoir spirituel (Choay, 2009, p.10-18).



Figure 5.1. Restitution du plan de la ville de Haradum. Source : <https://www.academia.edu/figures/6284767/figure-9-haradum-treatment-of-the-plan-drawing-by> , consulté en Avril 2025.

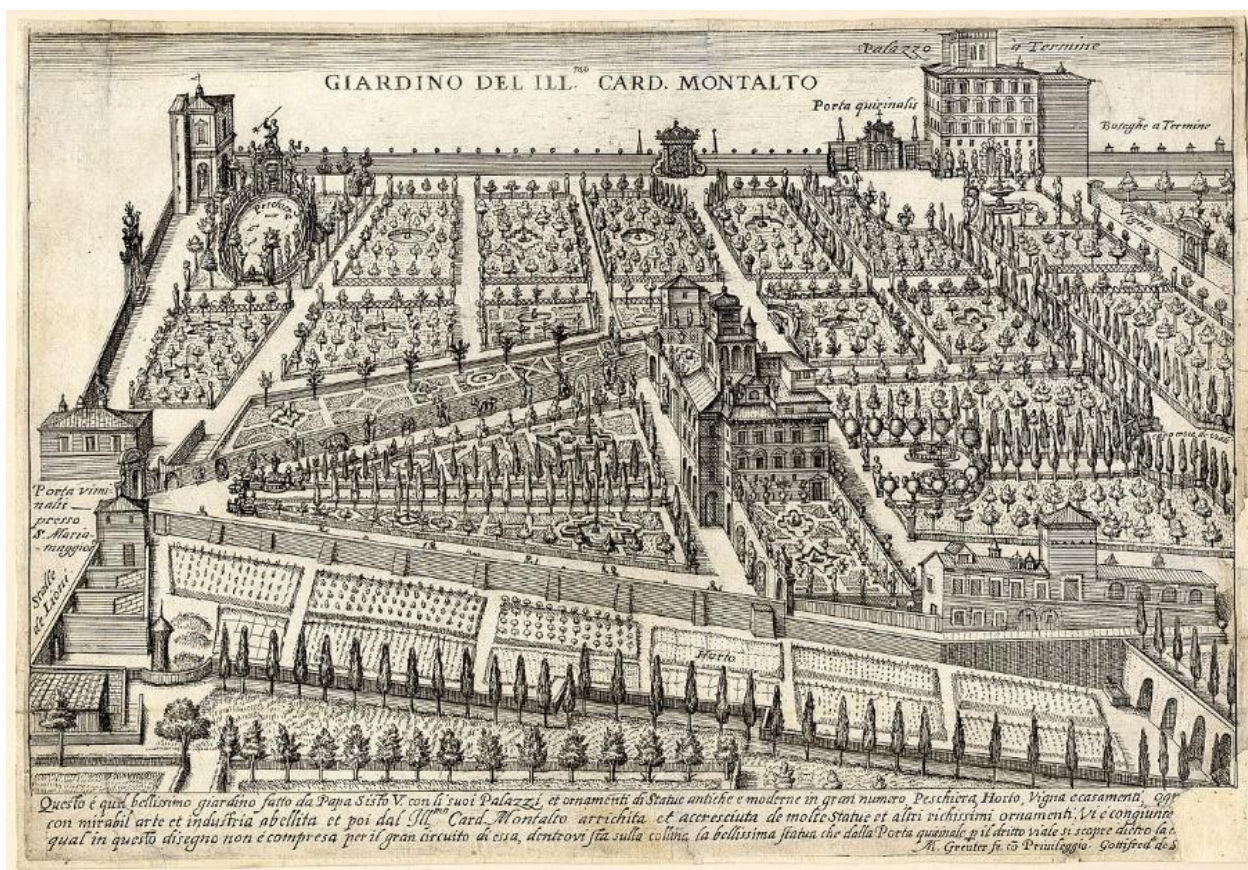


Figure 5.2. Vue sur Rome à l'époque du pape Sixte Quint. Source : <https://www.finestresullarte.info/fr/expositions/1585-lorsque-rome-est-devenue-une-metropole-une-exposition-dans-les-marches-rappelle-la-renovation-de-sixte-quent>, consulté en Avril 2025.

Après l'Antiquité, où la régularité des tracés reflétait une volonté d'ordre et de rationalité, et la Renaissance, qui fit de la perspective un instrument de mise en scène urbaine et de représentation du pouvoir, d'autres périodes ont projeté leurs propres idéaux dans l'organisation du réseau viaire. Après ces conceptions centrées sur l'ordre et la représentation, de nouvelles visions urbaines apparaissent, marquées par l'utopie sociale et la recherche d'harmonie. Les projets de cités idéales illustrent particulièrement cette aspiration à concevoir la ville comme un cadre harmonieux et équilibré, où l'agencement des rues devait traduire un idéal social et politique. Ainsi, la Cité du Soleil de Campanella ou la Saline royale d'Arc-et-Senans conçue par Ledoux expriment la volonté d'intégrer rationalité géométrique, bien-être collectif et organisation fonctionnelle, faisant de la trame viaire un outil de réforme morale et sociale. Au XIXe siècle, face aux bouleversements liés à l'industrialisation et aux grands travaux d'urbanisation, une partie des urbanistes adopte un regard critique et nostalgique, valorisant les formes du passé. L'urbanisme culturaliste, en particulier, oppose aux tracés géométriques trop rigides l'esthétique organique des villes médiévales ou antiques. Dans cette perspective, la rue n'est pas seulement un axe de circulation mais un espace chargé de mémoire et de symbolique. Camillo Sitte, figure emblématique de ce courant, préconise des plans irréguliers et des rues brisées, inspirés des places anciennes, afin de créer des espaces publics vivants, propices au lien social et au bien-être des habitants (Choay, 1965, p. 21-29).

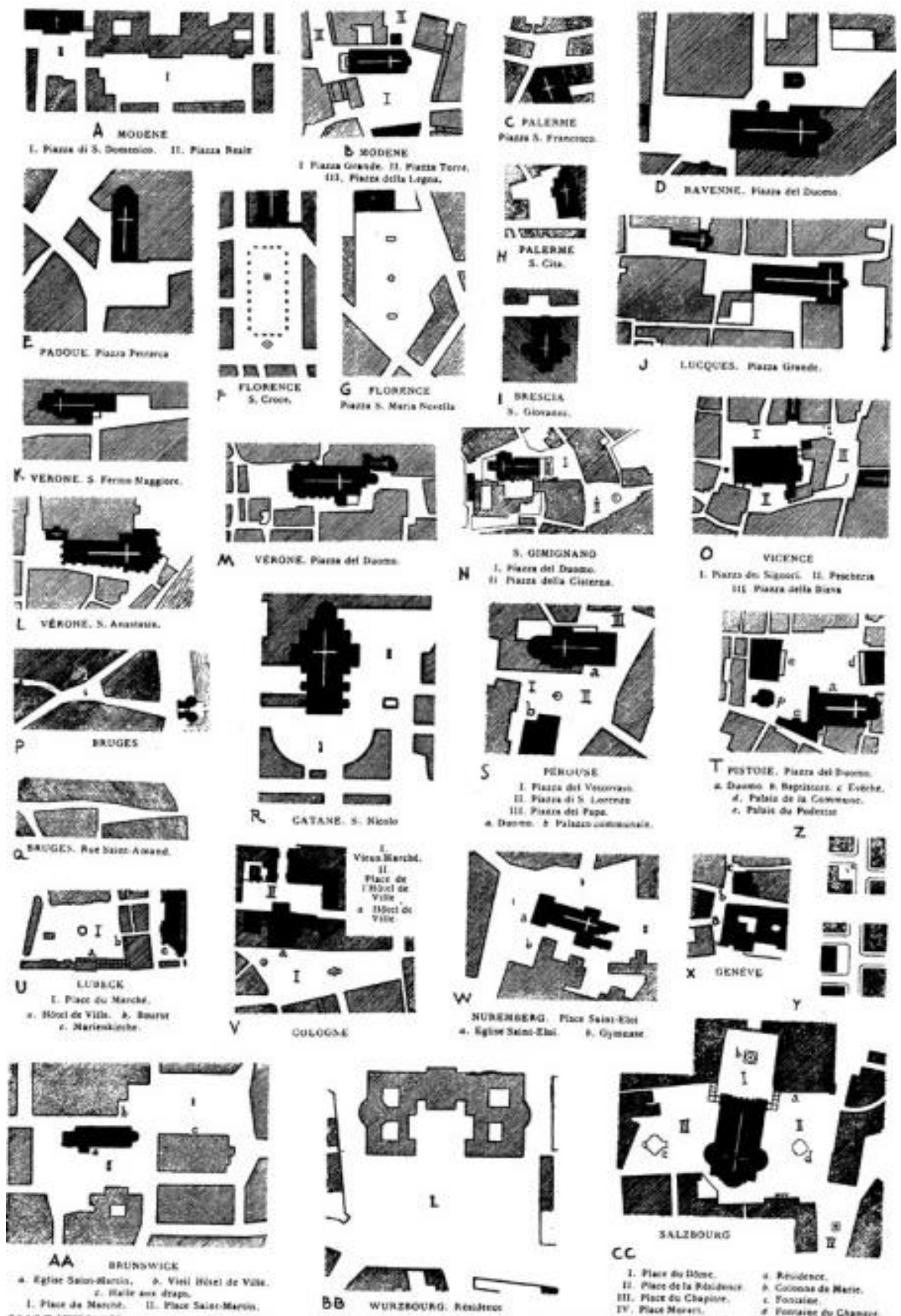


Figure 5.3. Etude des Places et des rues médiévales. Source : Sitte (1996).

2.2. Le réseau viaire comme lieu de vie et d'urbanité

Au-delà de son rôle symbolique et de son impact visuel, le réseau viaire doit aussi être compris dans son usage quotidien et vécu, ce qui conduit à l'envisager comme un véritable lieu de vie. En effet, la rue n'est pas seulement un support physique destiné à assurer la circulation des personnes et des biens, mais également un espace vécu, directement lié à l'expérience sensible et à la perception quotidienne des habitants. Elle constitue un lieu de pratiques sociales, de rencontres, de mémoire et d'appropriation symbolique, où se tissent les relations de voisinage et s'expriment des dynamiques culturelles. L'espace viaire, dans cette perspective, dépasse sa simple fonction utilitaire pour devenir un élément identitaire et affectif de la ville. Le réseau viaire, ne se limite pas à l'addition de voies isolées : il forme une trame fondamentale, véritable squelette spatial qui organise les circulations, hiérarchise les accès et conditionne la morphologie urbaine (Fusco, 2018, p. 93–95). En articulant le vécu individuel de la rue et la structure globale du réseau, il est possible de comprendre comment l'expérience quotidienne et l'organisation systémique s'entrecroisent, produisant des formes urbaines complexes, à la fois héritées de l'histoire et en constante transformation.

Simultanément, Clair (2014) souligne que le réseau viaire en tant qu'espace public, est le lieu de multiples activités : brassages, conflits, manifestations sociales ou encore expressions de pouvoir. Mais il ne se réduit pas à un simple contenant de ces interactions ; il agit en retour sur elles. De ce fait, le réseau viaire peut être considéré comme un véritable lieu de vie. Cette fonction tient au fait que, contrairement à d'autres types de réseaux (électrique, d'assainissement, etc.), le réseau viaire n'est pas un simple tube, mais qu'il adhère à la localité. En effet, la plupart des voies de circulation irriguent l'espace grâce aux porosités qu'elles créent par les multiples accès assurés tout au long de leur tracé. Ces porosités constituent autant de points de contact entre les voies et les bâtiments, places publiques ou parcs qu'elles desservent. L'activité qui se déploie dans ces espaces déborde ou détend sur les rues, qui se voient ainsi dotées d'ambiances et de caractéristiques différenciées en fonction des espaces qu'elles bordent. On parlera ainsi de rue commerçante, d'allée résidentielle, d'avenue du parc... Ces questions d'urbanité sont largement abordées dans les travaux en études urbaines et en sciences sociales. De nombreuses recherches sur la conception des réseaux viaires ont ainsi défendu leur fonction de lieu de vie, en soulignant leur rôle d'espace public et de sociabilité.

2.3. Le réseau viaire comme support de la circulation

Après avoir envisagé le réseau viaire comme image de la ville et comme lieu de vie, il convient de revenir à sa fonction première et universelle : celle de support de la circulation. En effet, les rues et les voies structurent l'espace urbain avant tout par leur capacité à assurer la mobilité des individus, des marchandises et des informations. Le réseau viaire n'est pas seulement un squelette spatial ou un cadre symbolique : il constitue aussi une infrastructure fonctionnelle, destinée à organiser et hiérarchiser les flux qui traversent la ville. Dans cette perspective, son étude rejoint à la fois les préoccupations de la morphologie urbaine, de l'aménagement et des sciences de la mobilité, qui interrogent les liens entre accessibilité, hiérarchie viaire et dynamiques urbaines. Le réseau viaire constitue avant tout le support du mouvement des hommes et des véhicules dans l'espace urbain, autrement dit, le support de la circulation. Cette fonction, sans doute la plus ancienne, conserve aujourd'hui encore une importance centrale. Comme le rappellent Brès (1998), le citoyen est un être de mouvement et de locomotion, qui passe continuellement d'un territoire à un autre. Le déplacement en ville

revêt une telle importance qu'il constitue une condition nécessaire d'une inscription normale dans la vie sociale.

Ce rôle social du mouvement est largement repris dans la littérature. Hachi (2020, p.53-60) rappelle que les espaces urbains et les sociétés qui les habitent sont traditionnellement évalués en fonction de leur offre de mobilité, qu'elle soit sociale ou spatiale. La mobilité constitue un indicateur essentiel des relations sociales et du degré de socialisation des populations urbaines. De nombreux théoriciens et praticiens de l'urbanisme, depuis l'Antiquité jusqu'à nos jours, ont pensé la voie à l'aune des mouvements qu'elle supporte, proposant des principes et des recommandations sur la manière dont le réseau viaire pouvait remplir au mieux sa fonction de support de la circulation. Il convient enfin de rappeler que la notion de circulation ne concerne pas seulement les déplacements des hommes et des véhicules. Elle inclut également la circulation de l'air, de l'eau et des matières diverses, qui s'opère elle aussi à travers le réseau viaire. Cette dimension a constitué un enjeu majeur, notamment aux XVIII^e et XIX^e siècles, dans le cadre des débats sur l'hygiène, la salubrité et la gestion des flux urbains.

2.4. Refus et rejet moderniste

Ainsi, au XVIII^e et XIX^e siècles, les débats hygiénistes ont profondément modifié la manière de concevoir la rue et le réseau viaire. Ceux-ci n'étaient plus seulement envisagés comme des espaces de circulation pour les hommes et les marchandises, mais comme des vecteurs essentiels de la salubrité urbaine. La rue devait alors assurer la diffusion de l'air, l'évacuation des eaux usées et des déchets, et participer à un assainissement global de la ville, condition préalable à la santé publique. Cette conception traduit une première approche fonctionnaliste, où l'efficacité des flux matériels et immatériels prime sur la dimension strictement morphologique de l'espace. Elle marque un tournant, en introduisant une logique d'utilité et de rationalisation qui prépare en partie le terrain aux conceptions modernistes du XX^e siècle (Barles, 2011). Cependant, si les hygiénistes restaient encore attachés à une certaine continuité entre les fonctions sanitaires et les usages sociaux de la rue, le mouvement moderne opérera une véritable rupture.

En effet, après l'essor des conceptions hygiénistes aux XVIII^e et XIX^e siècles, qui avaient introduit une vision fonctionnaliste de la rue en l'associant à la circulation de l'air, de l'eau et des déchets pour garantir la salubrité urbaine, le XX^e siècle marque une véritable rupture. Dans une volonté de rationalisation radicale, la rue est réduite à un simple dispositif technique, perdant ses fonctions sociales, symboliques et esthétiques au profit d'une logique de flux automobile et d'efficacité fonctionnelle. Conséquemment, la rue traditionnelle, espace d'interaction, de représentation et de vie quotidienne, se voit progressivement dévalorisée et remplacée par une vision mécaniste de l'urbain, centrée sur la circulation et la standardisation des formes. Le Mouvement Moderne, porté par les Congrès Internationaux d'Architecture Moderne (CIAM) et ses figures emblématiques, rompt avec l'idée d'une continuité entre fonctions sanitaires et usages sociaux de la rue. Dans la Charte d'Athènes (1933), Le Corbusier stigmatise la rue traditionnelle héritée des villes anciennes comme un espace congestionné, insalubre et inadapté aux exigences de la société industrielle et automobile (Le Corbusier, 1943). Sa formule radicale de la « mort de la rue » devient un véritable credo moderniste, appelant à l'abandon de la rue comme espace de vie collective au profit d'axes fonctionnels.

Cette vision trouve une traduction concrète dans ses projets emblématiques, notamment le plan voisin pour Paris proposé en 1925, qui proposait la démolition du centre historique au profit d'un quadrillage de gratte-ciel reliés par de larges voies rapides. De même, ses propositions pour Alger, Rio de Janeiro ou Chandigarh prolongent ce rejet de la rue traditionnelle au profit de plans hiérarchisés, où les circulations automobiles structurent la ville et remplacent les espaces de rencontre. Ce qui avait longtemps été pensé comme un lieu de sociabilité, de mémoire et d'urbanité se voit réduit à une infrastructure obsolète, incapable d'assurer la fluidité des circulations modernes. La priorité est désormais accordée aux flux, principalement automobiles, et à la rationalisation technique des déplacements. La rue comme espace de rencontre et de représentation s'efface ainsi au profit de l'autoroute urbaine, de la voie hiérarchisée et des infrastructures standardisées, inaugurant une vision mécaniste et techniciste de l'espace urbain.

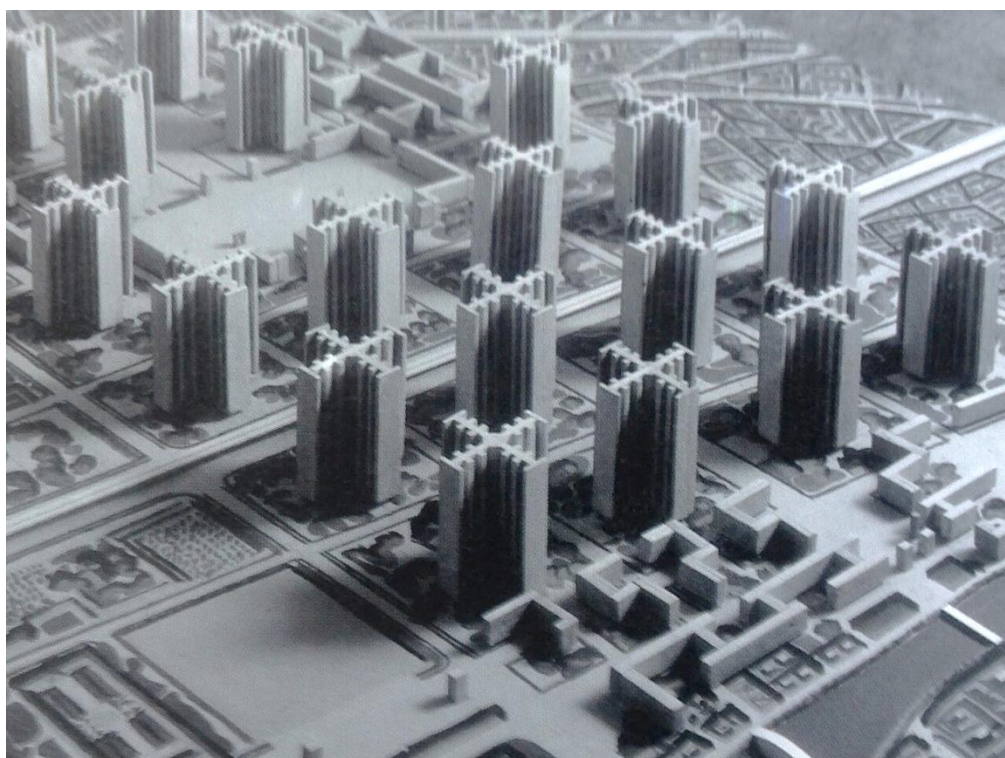


Figure 5.4. Maquette du plan voisin pour Paris. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Plan_Voisin, consulté en Avril 2025.

A posteriori, Frampton (1983) souligne que les effets de ce rejet moderniste de la rue furent rapidement perceptibles dans les pratiques urbanistiques du XX^e siècle. La fragmentation du tissu urbain, consécutive à la séparation stricte des fonctions (habiter, travailler, se recréer, circuler), entraîna une perte de cohérence des espaces résidentiels et accentua l'isolement des habitants. La suppression de la rue traditionnelle comme espace de vie collective priva les citoyens du lieu de sociabilité, de commerce, de jeu et de convivialité qui constituait le cœur de l'urbanité. La « machine à habiter » promue par Le Corbusier (1923) se traduit souvent par une déshumanisation des espaces, marquée par l'anonymat, la standardisation des formes bâties et l'absence de continuité historique avec les tissus urbains hérités. Cette rupture introduisit une véritable césure entre les lieux de vie quotidienne et les réseaux de circulation, réduits à des infrastructures techniques. Elle engendra une dépendance croissante à l'automobile, en même temps qu'une uniformisation et une perte de diversité dans l'expérience urbaine. Loin de répondre aux aspirations sociales et culturelles des

habitants, la ville moderniste, héritière du crédo de la « mort de la rue », produisit des environnements fonctionnels mais appauvris, où l'urbanité disparaissait au profit d'une logique mécaniste et abstraite de l'espace.

2.5. Réhabilitation et critiques postmodernes

Le mouvement moderne a profondément changé la ville, son influence a marqué l'ensemble du XX^e siècle. Cependant, dès la fin des années 1950, ses limites suscitèrent une vague de critiques, particulièrement à l'encontre de la réduction de la rue à un simple axe de circulation. Dans cette perspective, Jacobs (1961) réhabilita la rue comme cœur de l'urbanité, en insistant sur son rôle de lieu de vie sociale, de sécurité et de vitalité collective. Elle montre que la rue n'est pas seulement un espace physique, mais un acteur central des interactions quotidiennes, où se tissent les liens sociaux, la surveillance naturelle et la dynamique économique de quartier. Elle a aussi intégré les rues dans son approche de la complexité organisée : l'ordre urbain émerge de manière spontanée et progressive à travers les usages et pratiques des habitants, illustrant comment la vie quotidienne structure et anime l'espace public. Conjointement, Alexander (1965) partage cette perspective organiciste, critiquant la vision hiérarchique et fonctionnaliste du réseau viaire et proposant une organisation en demi-treillis, plus fidèle à la complexité des villes autoorganisées.

Parallèlement, en Europe, les écoles morphologiques se développaient en insistant sur l'importance du tissu urbain historique, de la hiérarchie des rues et des places et de la continuité morphologique, considérant la ville non seulement comme un ensemble fonctionnel, mais aussi comme un objet physique concret à étudier et à préserver. Leur analyse porte à la fois sur la structure spatiale, la forme des rues et des parcelles, et sur la cohérence architecturale du bâti, tout en soulignant la valeur sociale et culturelle de ces espaces. Elles mettent également l'accent sur la qualité des ambiances urbaines, la mixité des usages et la relation entre la rue et la vie quotidienne. Dans la continuité de cette remise en cause, Krier (1978) défend la ville traditionnelle, en mettant la rue et la place au centre de l'organisation urbaine et favorisant la continuité historique et la mixité fonctionnelle. Gehl (1971) complétait aussi cette approche en valorisant la rue comme espace d'interactions humaines et de convivialité, insistant sur la qualité des ambiances urbaines et des usages quotidiens.

Ces approches, prolongées par les mouvements du « *New Urbanism* » et par les principes de l'urbanisme durable, ont progressivement réintroduit la rue comme élément central dans la construction et l'organisation de la ville contemporaine. Elles cherchent à corriger les effets négatifs du modernisme, qui avait souvent produit des espaces vides, standardisés et déshumanisés, où les rues n'étaient plus que de simples corridors de circulation (Dupuis, 2009). La rue est ainsi redécouverte non seulement comme support de l'urbanité, mais aussi comme une structure complexe, capable d'articuler les flux de circulation des piétons, des véhicules et des transports publics, tout en intégrant les usages sociaux et commerciaux, et en favorisant les interactions humaines et la cohésion de quartier. Le « *New Urbanism* » valorise des principes tels que densité modérée, échelle humaine, diversité des formes urbaines et interconnexion des rues, faisant de ces dernières des éléments structurants et identitaires, générateurs de vitalité, de sécurité et d'appartenance. L'urbanisme durable complète cette vision en introduisant une dimension écologique et résiliente, en gérant les flux matériels et énergétiques à travers le réseau viaire, et en favorisant la porosité et l'adaptabilité des espaces urbains. Ces mouvements considèrent la rue comme un organisme vivant, combinant dimensions physique, sociale et culturelle. Elle relie les différentes

fonctions urbaines tout en respectant la morphologie et l'histoire des quartiers, devenant un lieu d'expérience, d'interaction et de vitalité, capable de concilier efficacité fonctionnelle, esthétisme et richesse sociale (Cozens et Hillier, 2008).

3. Lecture typologique du réseau viaire

Après avoir analysé les rues et le réseau viaire comme éléments morphologiques fondamentaux, lieux de vie et supports de circulation, il est pertinent de les examiner sous l'angle de la typologie. Cette approche consiste à classer et caractériser les différentes formes et configurations des voies urbaines afin de mieux comprendre leur structure, leurs interconnexions et leur évolution. Historiquement, l'analyse typologique a permis d'identifier des schémas viaires récurrents : orthogonal, radial, ou concentrique, et de relier leur forme à des logiques politiques, économiques, sociales ou techniques propres à chaque époque. Elle offre ainsi un outil complémentaire à l'observation morphologique et fonctionnelle, révélant les régularités et variations qui structurent les réseaux viaires à travers le temps et l'espace, tout en préparant l'étude détaillée de chacun de ces modèles.

3.1. Réseau Orthogonal

Le réseau orthogonal, également appelé réseau en damier, constitue l'un des modèles viaires les plus anciens et les plus répandus à travers l'histoire urbaine. Ses origines remontent au plan hippodamien de la Grèce antique, qui visait à organiser la ville selon des principes rationnels de symétrie et d'alignement, puis il fut largement diffusé par les Romains dans leurs colonies, assurant ainsi une organisation efficace et contrôlée du territoire. Le principe fondamental de ce modèle repose sur un quadrillage régulier où les rues se croisent à angle droit, générant des îlots aux dimensions homogènes et facilitant la division parcellaire, la gestion foncière et la planification des infrastructures (Choay, 1996). Au-delà de sa fonctionnalité, le réseau orthogonal traduit également une volonté de contrôle spatial et social : en imposant un ordre géométrique rigoureux, il reflète des normes urbanistiques, politiques et économiques qui favorisent la visibilité, la surveillance et la rationalisation des déplacements. Ce modèle a été largement repris à l'époque moderne, notamment dans les villes coloniales d'Amérique, d'Afrique et d'Asie, où il permettait de structurer rapidement des territoires nouveaux, d'assurer la lisibilité des espaces urbains et de faciliter la circulation des biens et des personnes (Benevolo, 2000).

Cependant, malgré ses nombreux avantages : simplicité de lecture, circulation fluide, organisation parcellaire rationnelle, le réseau orthogonal présente différentes limites. Sa rigidité structurelle le rend peu adaptable aux contraintes topographiques naturelles, aux cours d'eau ou aux reliefs irréguliers, et il peut également freiner l'expression de dynamiques sociales spontanées, telles que l'appropriation informelle de l'espace ou l'émergence de voies secondaires. Ainsi, le réseau orthogonal illustre une tension constante entre rationalité planificatrice et adaptation aux réalités locales, offrant un cadre idéal pour l'analyse comparative avec d'autres types de réseaux, plus souples ou organiques, qui répondent à des logiques d'évolution plus évolutives et contextuelles (Kostof, 1991).

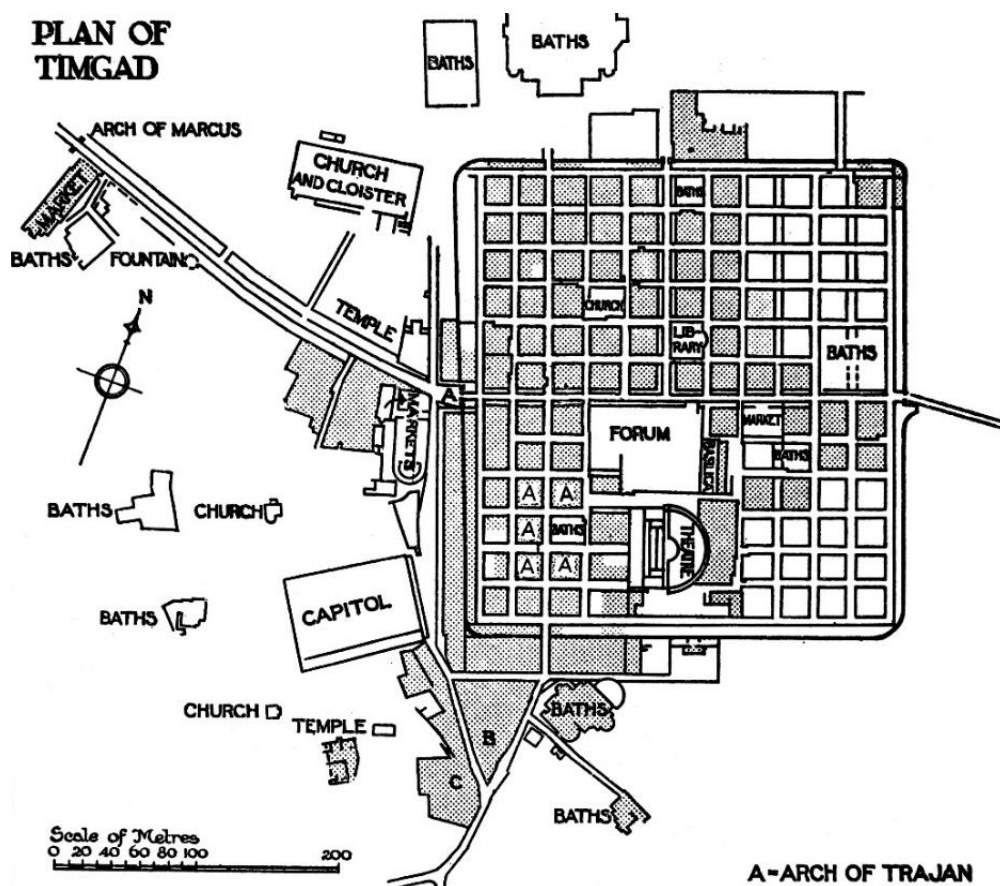


Figure 5.5. Plan du Timgad romain. Source : https://la.wikipedia.org/wiki/Marciana_Traiana_Thamugadi, consulté en Avril 2025.

3.2. Réseau concentrique

Douady (2014, p.41) définit le réseau concentrique comme une organisation spatiale en anneaux successifs entourant un centre, formant une structure gigogne. Ce principe d'emboîtement trouve de nombreux équivalents dans la nature, comme les cernes de croissance visibles dans la coupe d'un tronc d'arbre ou les courbes de niveau qui épousent les reliefs d'une colline isolée. Transposé à l'espace urbain, il traduit une dynamique de croissance par étapes successives autour d'un noyau initial, généralement matérialisée par des enceintes successives ou des boulevards périphériques hérités de leur démolition. Dans l'histoire urbaine, la croissance des villes s'est souvent accompagnée de la construction d'enceintes successives. La démolition ultérieure de ces fortifications a fréquemment donné naissance à des boulevards circulaires ou à des voies périphériques, dessinant ainsi des réseaux concentriques caractéristiques. Toutefois, ces réseaux ne sont pas nécessairement parfaitement circulaires, dans la réalité, ils adoptent plutôt des formes irrégulières. Dans certains cas, la structure concentrique résulte non pas de cercles réguliers, mais de l'emboîtement de figures distinctes (Frankhauser, 1994, p. 6-17).

De nombreux exemples historiques illustrent la logique concentrique dans la formation urbaine. À Paris, les enceintes successives construites entre le Moyen Âge et le XIX^e siècle de l'enceinte de Philippe Auguste aux fortifications de Thiers, ont laissé place, après leur démolition, à des boulevards périphériques tels que les Grands Boulevards ou le boulevard périphérique actuel, qui marquent encore aujourd'hui une structure concentrique de la capitale (Kostof, 1991). De manière similaire, Vienne a transformé son enceinte médiévale en un

boulevard circulaire monumental, le « *Ringstrasse* », au XIX^e siècle, combinant ainsi héritage défensif et urbanisme moderne (Benevolo, 2000). D'un point de vue dynamique, ce type de réseau naît généralement d'une croissance progressive à partir d'un centre ou d'une première enceinte, mais il peut aussi découler de subdivisions successives issues d'une enceinte extérieure. Sur le plan formel, les réseaux concentriques ne sont pas toujours parfaitement circulaires : ils présentent généralement des contours irréguliers, liés aux contraintes du site et à l'évolution historique. La dynamique de ce type de réseau traduit souvent une tension entre centralité et extension. D'une part, il renforce la lisibilité et la hiérarchisation urbaine en mettant en valeur un centre identifiable et en organisant la croissance autour de celui-ci. D'autre part, il peut générer des discontinuités spatiales et des effets d'enclavement, particulièrement lorsque les boulevards périphériques deviennent des coupures physiques ou sociales. Ainsi, le réseau concentrique illustre une logique d'organisation urbaine où la stratification historique, les impératifs défensifs et les processus de centralisation se combinent pour produire une forme à la fois lisible et contraignante (Douady, 2014, p.41).

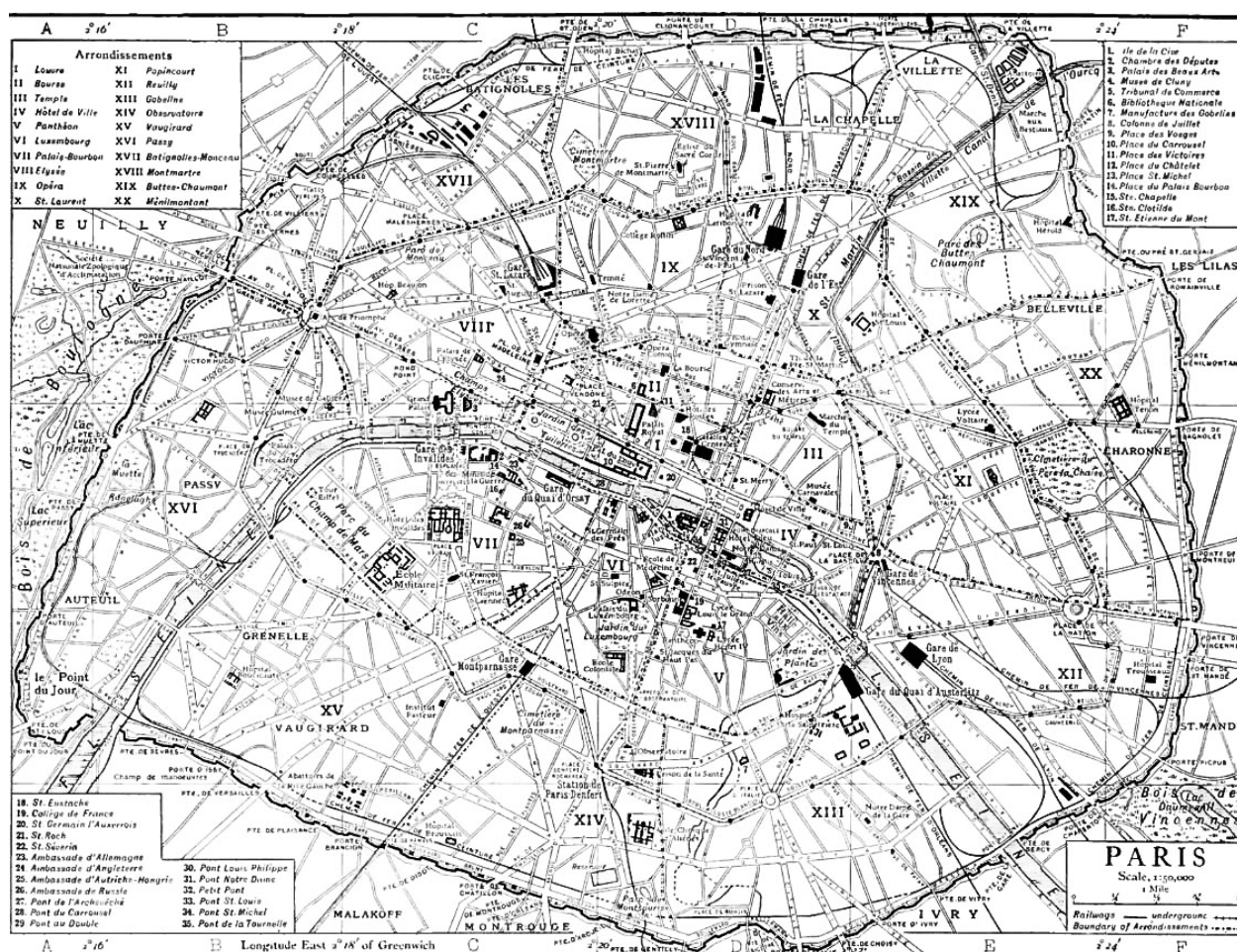


Figure 5.6. Plan de Paris en 1911. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Plans_de_Paris, consulté en Avril 2025.

3.3. Réseaux Radial

Douady (2014, p. 43) définit le réseau radial comme une organisation composée de lignes convergeant toutes vers un même point central. Ce schéma est observable dans la nature à travers les pieds de vent, rayons du soleil traversant les nuages, ou encore dans la perspective géométrique, où des droites parallèles semblent converger vers un point de fuite. Transposé à l'espace urbain, il correspond aux voies rayonnant à partir d'un noyau central, que ce soit une

place, un monument ou un centre administratif, ou encore aux chemins reliant un village à ses champs environnants. Historiquement, le réseau radial est souvent lié à une volonté de mise en scène et de hiérarchisation spatiale. Les villes de la renaissance et de l'époque baroque en offrent des exemples remarquables : Versailles, conçu autour du château avec ses avenues rayonnantes, illustre la traduction spatiale du pouvoir monarchique ; à Rome, les interventions de Sixte Quint au XVI^e siècle ont relié les grandes basiliques par des axes radiaux, affirmant le rôle symbolique et religieux de la ville (Benevolo, 2000).

Plus tard, au XIX^e siècle, les transformations haussmanniennes à Paris introduisent également des percées radiales autour de places monumentales comme l'Étoile, où douze avenues convergent vers l'Arc de Triomphe, renforçant à la fois visibilité et centralité (Douady, 2014, p. 43). La dynamique de ce type de réseau peut résulter soit d'une croissance spontanée par convergence vers un pôle attractif, soit d'une planification globale pensée dès l'origine. Ses avantages résident dans la clarté hiérarchique, la mise en valeur du centre et la visibilité des axes. Toutefois, cette organisation renforce les inégalités spatiales : elle concentre les flux et les fonctions dans le noyau central, au risque de congestion et de déséquilibre entre centre et périphérie (Kostof, 1991).

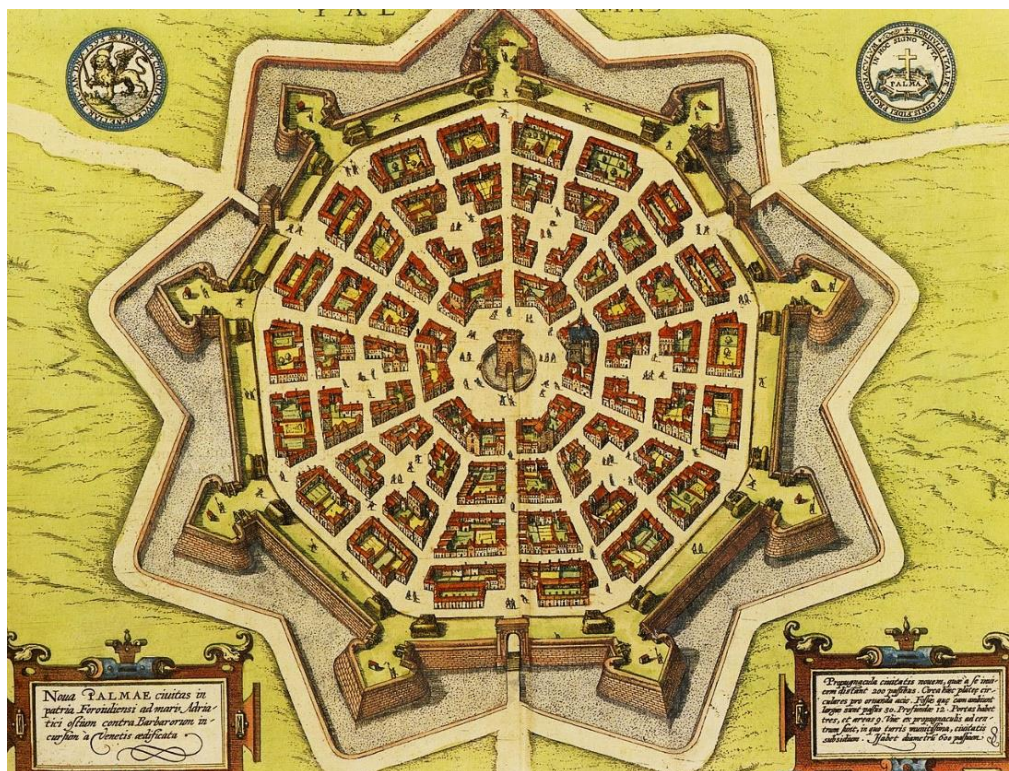


Figure 5.7. Plan de Palmanova en 1600. Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Palmanova>, consulté en Avril 2025.

3.4. Réseau en arbre

Douady (2014, p. 41) définit le réseau en arbre comme une démultiplication du réseau radial, où les branches principales se subdivisent à leur tour en ramifications secondaires, suivant un processus de ramification hiérarchique. La métaphore végétale de l'arbre illustre clairement ce modèle : un tronc central qui se divise en branches, puis en rameaux. Ce type de structure se rencontre fréquemment dans la nature, notamment dans les réseaux hydrographiques, à condition de ne pas tenir compte des îles qui interrompent la continuité. En milieu urbain, on

l'observe par exemple lorsqu'un seul point d'accès dessert un ensemble d'impasses, ou encore au débouché d'un pont, si l'on considère uniquement les voies rayonnantes avant leur connexion à un maillage plus lointain. Du point de vue dynamique, un réseau en arbre peut résulter soit d'un processus de croissance à partir d'un point initial – comparable à une graine dont les ramifications se développent progressivement –, soit, au contraire, d'une convergence vers un point aval unique, à partir de sources multiples, comme dans l'organisation des bassins hydrographiques.

Le réseau en arbre s'observe moins à l'échelle de la ville entière qu'à celle de quartiers ou de secteurs spécifiques. Sa structure, qui part d'un point d'accès unique (le tronc) pour se ramifier en voies secondaires (les branches), puis tertiaires (les rameaux), est généralement le fruit d'une planification intentionnelle plutôt que d'une évolution spontanée. Contrairement aux réseaux maillés, il privilégie une hiérarchisation stricte des circulations, chaque voie dépendant d'un axe supérieur. Ce modèle est particulièrement visible dans les lotissements résidentiels modernes, notamment ceux développés à partir du milieu du XX^e siècle sous l'influence de l'urbanisme fonctionnaliste. Dans de nombreuses banlieues nord-américaines, la rue principale distribue des ensembles de culs-de-sac, limitant la pénétration des flux automobiles et décourageant le trafic de transit. Cette configuration répond à une logique de sécurité et de confort résidentiel : la hiérarchisation des voies isole les zones d'habitation des flux rapides, garantit la tranquillité et favorise une appropriation sociale de la rue comme espace local (Southworth et Ben-Joseph, 1995).

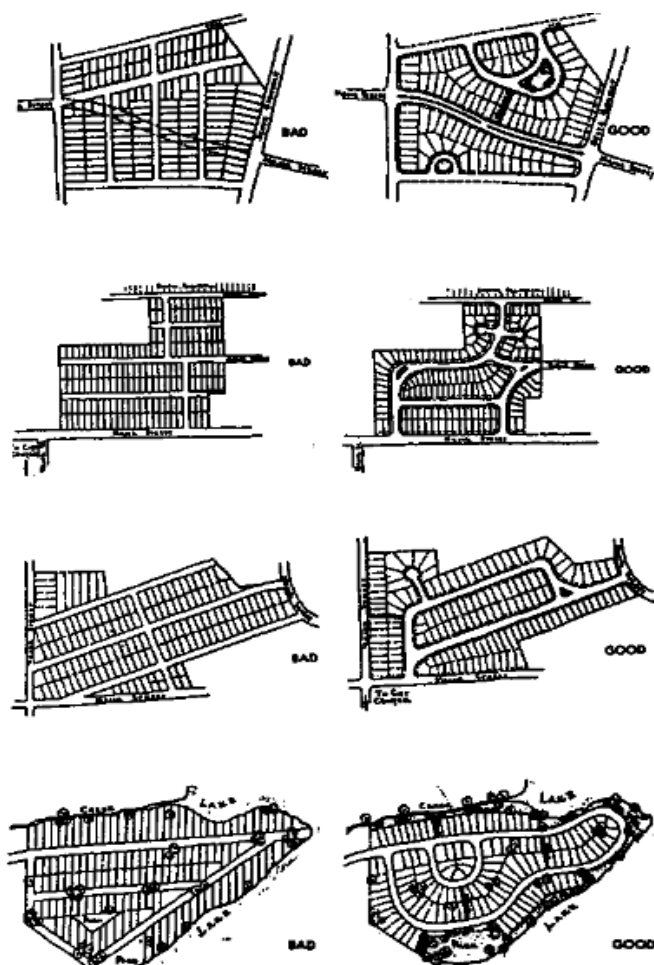


Figure 5.8. Différentes configurations de l'aménagement en réseau arborassent dans la banlieue américaine. Source : Southworth et Ben-Joseph (1995).

Il est important de rappeler que les types de réseaux viaires ne doivent pas être compris comme des catégories fixes et définitives. En réalité, chacun de ces types recouvre différents variants et même des sous-variants. Par exemple, un même type peut se manifester de manière régulière ou irrégulière, continue ou fragmentée, selon le relief, l'histoire, la culture ou les usages sociaux qui l'ont façonné. Cette diversité interne montre que derrière chaque modèle se cache en réalité une famille de configurations possibles, qui ne se laisse pas enfermer dans une définition unique. En réalité, il est rare qu'une ville ou qu'un quartier corresponde exactement à un modèle pur. Les réseaux viaires apparaissent le plus souvent comme des combinaisons hybrides, où s'entrecroisent plusieurs logiques partielles issues de contextes différents (Douady, 2014, p. 44-63). Cette hybridité n'est pas une exception, mais bien la règle : les formes urbaines résultent toujours de processus multiples, d'adaptations successives et d'interactions complexes entre contraintes matérielles, choix politiques, traditions culturelles et dynamiques sociales. De plus, la typologie couramment utilisée ne saurait être considérée comme exhaustive. Elle ne fait que mettre en avant quelques grands modèles. Certaines configurations échappent aussi aux cadres traditionnels, parce qu'elles sont liées à des conditions locales très particulières ou à des trajectoires morphogénétiques originales. C'est pourquoi il est essentiel de voir la typologie non comme un inventaire fermé de formes, mais comme une grille d'analyse souple, qui aide à repérer des tendances générales tout en restant ouverte à la reconnaissance des formes hybrides.

De plus, les analyses morphologiques classiques, les études urbaines et la lecture typologique du réseau viaire s'appuient surtout sur un cadre de pensée marqué par l'eurocentrisme. En effet, elles ont été construites à partir d'exemples européens : la Grèce, Rome, la Renaissance ou encore Paris haussmannien, qui servent de modèles de référence. Cette approche accorde une place centrale aux expériences européennes et tend à présenter des critères comme la régularité, la monumentalité ou la planification rationnelle comme des normes universelles. Cela réduit la diversité réelle des formes urbaines et relègue les autres traditions à un rôle secondaire ou marginal. Lorsqu'on applique ces grilles de lecture à des contextes différents, leurs limites apparaissent clairement. Les villes d'autres aires culturelles se sont formées à partir de logiques sociales, religieuses et spatiales propres, souvent très éloignées de celles qui ont marqué l'histoire européenne. Dans ce sens, la typologie ne peut pas être comprise comme une explication valable pour toutes les villes, mais plutôt comme un outil simplificateur et comparatif. Pour rester utile, elle doit être complétée par une lecture dynamique et contextualisée, capable de tenir compte des spécificités culturelles et morphogénétiques de chaque cas.

3.5. Réseau organique, ordre et désordre

Marshall (2005, p. 98-169) reconnaît l'intérêt de l'analyse typologique pour distinguer des formes fréquentes comme la grille, l'arborescence, ou encore les formes hybrides, mais il en critique rapidement les limites. Selon lui, ces typologies sont souvent trop rigides et statiques, car elles réduisent la complexité et l'évolution progressive des tissus urbains à des catégories abstraites. Cette critique vise aussi les nouveaux courants comme le « *New Urbanism* », qui tendent à ériger la grille comme modèle universel à reproduire, alors qu'historiquement les villes se sont constituées non par l'imitation d'un modèle précis, mais par application de règles simples et contextuelles sur la durée. Pour dépasser ces limites, Marshall propose de renouveler la typologie descriptive par une approche fondée sur la composition structurelle des réseaux, qui analyse non pas les formes statiques, mais les principes constitutifs (continuité, hiérarchie, connectivité, compatibilité modale) qui produisent et transforment les

motifs urbains ; autrement dit, il s'agit de passer d'une lecture figée des types à une compréhension de la morphogenèse progressive des rues et réseaux.

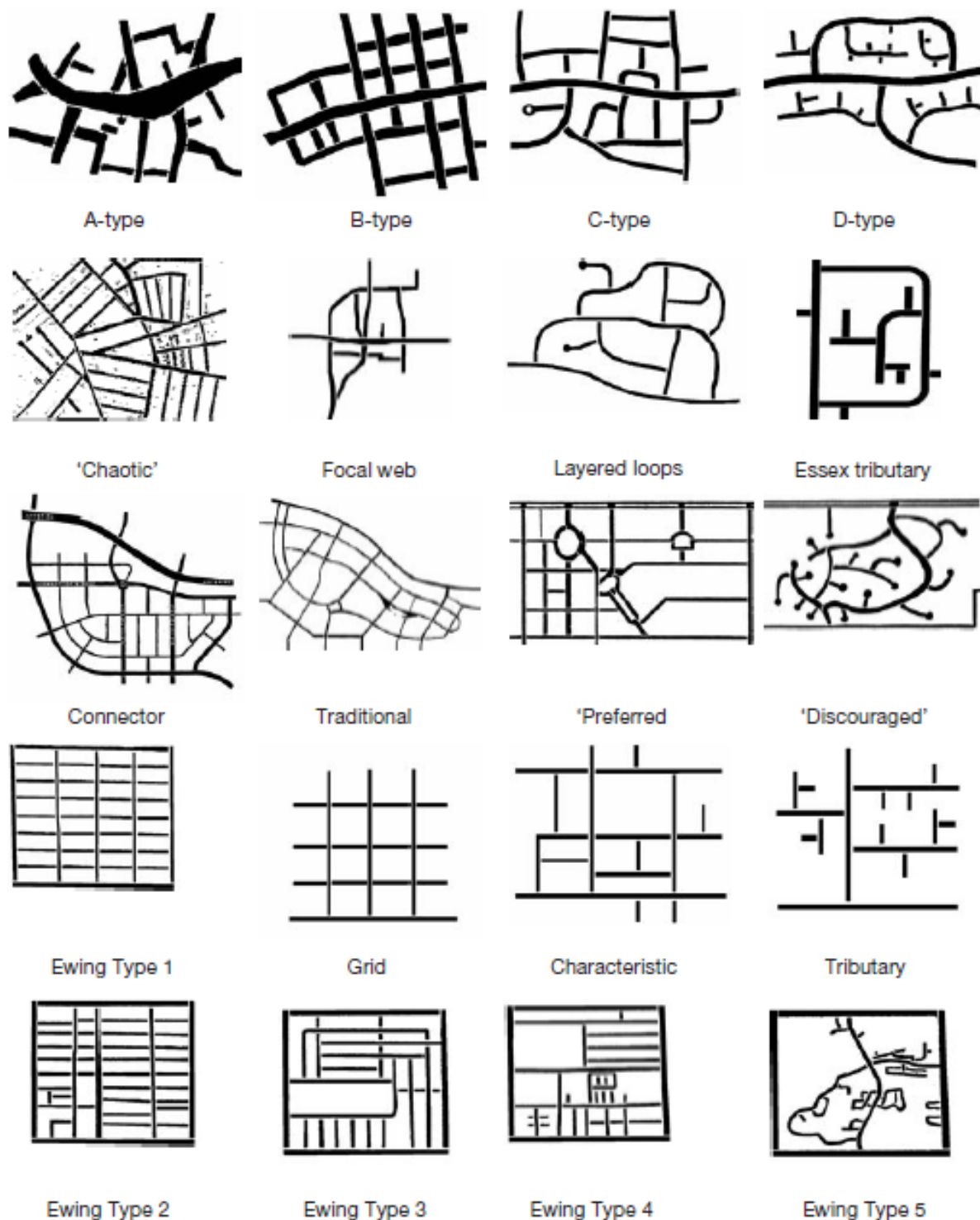


Figure 5.9. Typologie du réseau viaire. Source : Marshall (2005).

En effet, Les réseaux organiques se distinguent des configurations planifiées par leur formation incrémentale et adaptative. Là où les modèles orthogonaux, radiaux ou concentriques résultent d'une conception globale, l'organique émerge de décisions locales cumulatives et d'ajustements progressifs guidés par l'usage quotidien, les contraintes topographiques et les pratiques sociales. Cette logique produit une structure hétérogène, sans

régularité géométrique stricte, mais révèle une cohérence d'ensemble. Sous l'angle des sciences de complexité, Nilsson et Gil (2019) montrent que la distribution des connexions dans ces réseaux suit une loi de puissance, illustrant la coexistence d'ordre et de désordre. L'ordre se manifeste à petite échelle dans la répétition de motifs locaux : alignements, continuité des ruelles, connexions fonctionnelles, tandis que le désordre apparaît à grande échelle à travers la diversité des tracés, la multiplicité des impasses et l'adaptation au relief ou aux cours d'eau. Cette double logique traduit le fonctionnement des systèmes complexes adaptatifs, où la cohérence globale résulte de l'accumulation d'interactions locales et de la dynamique cumulative du réseau.

Marshall (2005, p. 95-150) insiste par ailleurs sur le fait que de nombreux tissus urbains anciens : médinas, villes médiévales européennes, centres historiques, présentent des réseaux viaires qualifiés d'organiques, car ils semblent irréguliers et dépourvus de logique géométrique immédiate. Il distingue deux types d'ordre : l'ordre apparent, que l'on retrouve dans les réseaux réguliers tels que la grille, dont la symétrie et la répétition expriment une organisation lisible ; et l'ordre caché, propre aux réseaux organiques, qui n'est pas immédiatement visible mais existe dans la continuité des parcours, la hiérarchie implicite des axes et la capacité d'orientation des habitants. Les réseaux organiques relèvent ainsi d'un autre registre d'organisation, fondé sur l'évolution incrémentale plutôt que sur un plan figé. Pour objectiver cette idée, Marshall mobilise la théorie des graphes et des mesures de complexité. Il montre que l'on peut analyser un réseau organique par sa connectivité (nombre de liens par intersection), sa profondeur topologique (nombre d'étapes pour relier deux rues) ou son degré de complexité (diversité des itinéraires possibles). Ces indicateurs révèlent que les réseaux apparemment irréguliers répondent à des logiques mesurables et possèdent un ordre interne qui échappe à une simple lecture géométrique. En ce sens, les réseaux organiques sont des exemples d'ordre émergent, produit par des règles locales simples, ajout progressif de rues, adaptation aux usages et aux contraintes, qui, au fil du temps, génèrent un système global cohérent.

En synthèse, la rue et le réseau viaire se révèlent être bien plus que de simples infrastructures de circulation. Ils constituent des éléments structurants de la forme urbaine, des vecteurs de sociabilité et des indicateurs des dynamiques sociales, économiques et culturelles. L'analyse morphologique, typologique et historique a permis de mettre en évidence la diversité des configurations viaires, leurs fonctions multiples et les logiques de planification ou d'auto-organisation qui les sous-tendent. Cependant, ces approches classiques, souvent développées à partir de l'étude de villes européennes, atteignent leurs limites lorsqu'il s'agit de comprendre des systèmes urbains complexes et évolutifs comme ceux des villes islamiques traditionnelles, dont la morphogenèse repose sur des dynamiques locales, des ajustements progressifs et des logiques sociales spécifiques.

4. Rue et réseau viaire dans la ville islamique

Le réseau viaire constitue l'ossature fondamentale de toute ville, structurant les déplacements, les relations sociales et l'organisation spatiale. Dans le cadre des villes islamiques traditionnelles, il reflète non seulement les contraintes topographiques et fonctionnelles, mais aussi les logiques culturelles, sociales et religieuses qui ont guidé la morphogenèse urbaine. Comme discuté dans le chapitre 4, la question du réseau viaire avait déjà été abordée dans le cadre général de l'organisation urbaine, permettant de situer ses principales fonctions et ses relations avec les unités résidentielles et les différents équipements. En effet, rues et réseau viaire des villes islamiques traditionnelles ont été l'objet de débats controversés à travers

l'évolution des paradigmes urbains. Les premières analyses orientalistes les ont souvent dépréciés ou interprétés de manière partielle, tandis que les lectures tardives plus objectives, bien qu'améliorant la compréhension, sont restées principalement descriptives. C'est la perspective processuelle, fondée sur les mécanismes juridiques et sociaux propres à l'urbanisme islamique, qui permet de décoder la profondeur et la logique interne de ces réseaux. Dans ce qui suit nous proposons une vision complémentaire, en approfondissant l'analyse du réseau viaire lui-même.

4.1. Hiérarchie et type

Nous avons montré que l'espace de la médina se structure selon une hiérarchie claire, allant des lieux centraux collectifs vers les espaces résidentiels les plus intimes. Cette logique d'organisation se reflète également dans le réseau viaire, qui reproduit à son tour cette gradation en proposant des niveaux de circulation différenciés. Les grandes artères reliant les portes de la ville, la mosquée et le souk coexistent avec des rues secondaires desservant les quartiers, et avec des impasses ou passages plus restreints menant aux unités résidentielles. La hiérarchie spatiale et la hiérarchie viaire apparaissent ainsi étroitement imbriquées, traduisant une cohérence d'ensemble propre à la morphogenèse urbaine islamique.

Dans cette perspective, Al-Hathloul (1981, p. 30–34) souligne que dès Médine, restructurée après l'hégire, on observe l'ébauche d'une hiérarchie viaire. La ville, organisée autour de la mosquée et du souk, était parcourue par des voies principales dont les largeurs, définies entre 6 et 10 coudées (soit environ 3 à 5 mètres), variaient selon leur localisation et leur importance. Ces axes reliaient les pôles essentiels (mosquée, marché) et constituaient la trame majeure de circulation, tandis que les îlots résidentiels « *khitat* » étaient desservis par des voies secondaires plus étroites. La mention précise des largeurs traduit une volonté de régulation qui distingue entre grands axes collectifs et ruelles desservant les unités résidentielles. Ces ruelles étroites « *sikka*, *derb* » constituaient l'armature fine du tissu résidentiel et, contrairement aux artères principales, pouvaient être considérées comme des espaces semi-publics, gérés par les familles riveraines. Dans certains cas, elles étaient fermées par des portes afin de contrôler l'accès et de préserver la sécurité et l'intimité des habitants.

Le modèle de Médine servait de référence pour les villes nouvellement fondées. Mortada (2003, p. 83-96) confirme qu'à Koufa, une hiérarchie fut explicitement instituée : 40 coudées pour les grandes artères, 20 pour les voies intermédiaires, 12 pour les ruelles et 7 pour les culs-de-sac. Cette gradation, reprise ensuite à Kairouan, Fostat et Bagdad, garantissait la cohérence fonctionnelle du réseau. Au-delà des dimensions, Mortada insiste sur le fait que la hiérarchie viaire reflétait la structure sociale de la ville islamique : les grandes rues publiques reliaient les espaces majeurs (mosquée principale, souk, Dar al-imara), tandis que les rues secondaires distribuaient les quartiers. Les ruelles et culs-de-sac « *Zouqag*, *Hawsh* » constituaient des extensions de l'espace privé : ils servaient d'abord aux habitants immédiats et matérialisaient la communauté de voisinage. Dans de nombreux cas, ces culs-de-sac pouvaient être fermés par des portails, renforçant leur statut semi-privé. La rue, loin d'être un simple axe de circulation, devenait ainsi le reflet d'une hiérarchie sociale et juridique allant du public vers le privé.

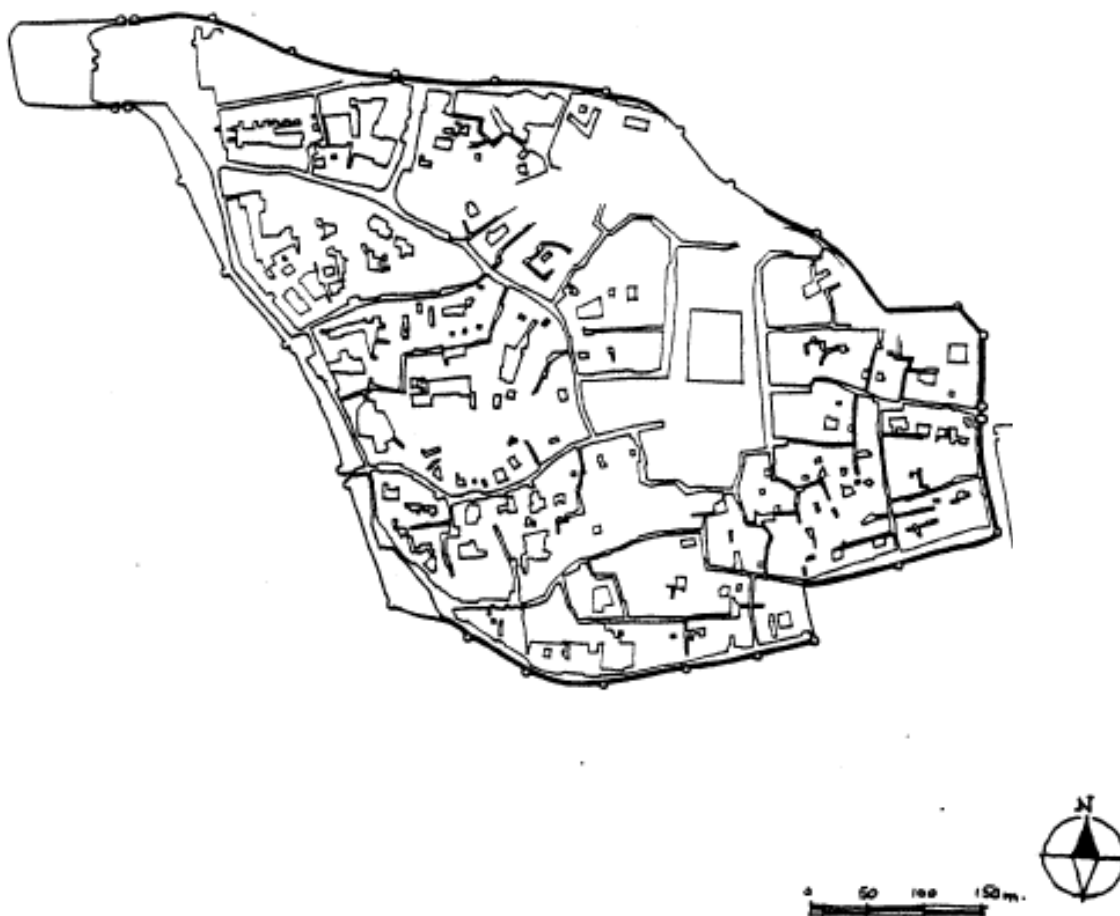


Figure 5.10. Réseau viaire de Médine au moyen âge. Source : Al-Hathloul (1981).

Akbar (1984, p. 172-190) prolonge cette analyse en insistant sur le rôle du processus de densification. Avec la croissance urbaine, les vides entre les khitat furent progressivement comblés par des constructions privées, ce qui transforma la configuration initiale. Les grandes artères restèrent en place, mais les espaces interstitiels se refermèrent, donnant naissance à un réseau dense et apparemment tortueux de ruelles. Cette transformation progressive illustre comment la logique de responsabilité locale engendrait des tissus urbains organiques, où les voies secondaires ne résultaient pas d'un tracé préétabli mais d'initiatives successives des habitants. Le cas de Bagdad est révélateur : conçue initialement comme une ville planifiée et circulaire, avec un réseau rayonnant et concentrique, elle fut rapidement remodelée par la densification et les appropriations foncières. Des ruelles privées, impasses et détours émergèrent, perturbant la symétrie originelle. Fostat offre un autre exemple : chaque tribu aménageait ses propres passages internes dans les khitat, produisant un réseau irrégulier de « *Sikkat* » et de « *Zouqaq* ». Pour Akbar, cette évolution n'était pas anarchique, mais encadrée par les règles juridiques de voisinage et de circulation. Le résultat fut un maillage complexe où les impasses et passages étroits exprimaient la logique sociale de l'appropriation.

Hakim (1986, p. 63-66), à travers son analyse morphologique de la médina de Tunis, met en évidence une hiérarchie des rues organisée en trois niveaux. Il montre la trame centrale de Tunis et son articulation avec les impasses. Il insiste sur la souplesse de ce système : chaque niveau de rue remplit une fonction distincte mais complémentaire, garantissant la fluidité des circulations majeures tout en préservant l'intimité des espaces domestiques. Les « *Sabat* » (passages couverts) et les voûtes des souks apparaissent comme des solutions

spatiales originales permettant d'articuler espace public et besoins privés. La rue n'était donc pas seulement un lieu de passage, mais un espace de négociation entre usages collectifs et individuels. Ainsi les rue sont hiérarchisée en :

- Rues principales, reliant les portes de la ville à la mosquée centrale et aux souks, souvent couvertes par des voûtes ou des Sabat dans leurs portions marchandes ;
- Rues secondaires, connectant les grandes artères et desservant des quartiers entiers ;
- Rues tertiaires et impasses, pénétrant dans les tissus résidentiels et se terminant souvent en culs-de-sac, véritables prolongements semi-privés des maisons.

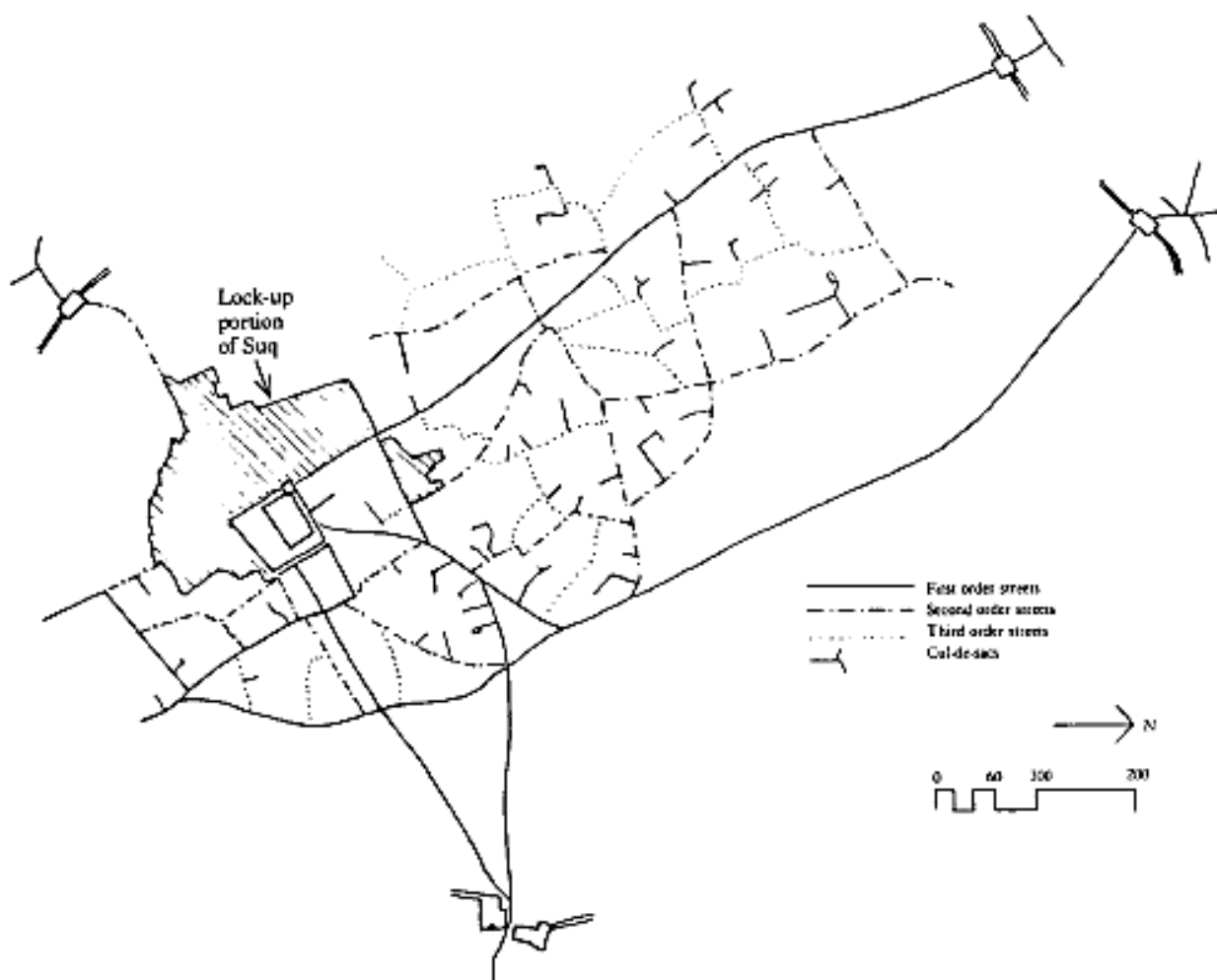


Figure 5.11. Hiérarchie viaire de la médina de Tunis. Source : Hakim (1986)

4.2. Règles et statut juridique

L'analyse de la hiérarchie du réseau viaire montre que celui-ci ne se réduit pas à une organisation spatiale fonctionnelle, mais traduit également une logique sociale et culturelle propre à la ville islamique traditionnelle. Cette logique trouve son fondement dans un ensemble de règles juridiques et de mécanismes coutumiers qui encadrent la formation, l'usage et la transformation des rues. Le droit islamique définit en effet les statuts différenciés des espaces publics, semi-publics et privés, en fixant des principes relatifs à la largeur minimale des voies, aux droits de passage, aux conditions de fermeture d'une ruelle ou encore

à l'entretien collectif. Ces règles, loin d'être purement théoriques, ont joué un rôle déterminant dans la morphogenèse du réseau viaire, en orientant les pratiques des habitants et en assurant un équilibre entre intérêt commun et droits particuliers. Dans cette perspective, la rue dans la médina doit être comprise non seulement comme un espace physique, mais aussi comme un espace juridiquement défini, produit par une interaction constante entre normes religieuses, décisions locales et usages sociaux.

Concernant la dimension et de la largeur des voies, Hakim (1986, p.26-27) confirme que le droit islamique apportait des prescriptions précises destinées à préserver à la fois la circulation fluide et le respect mutuel entre les habitants. Un Hadith du Prophète, souvent invoqué dans la jurisprudence urbaine, énonce : « *Si vous vous disputez au sujet des routes, laissez au moins sept coudées* ». Cette règle avait une valeur normative claire : elle fixait un seuil minimal pour la largeur des voies publiques, traduisant une préoccupation à la fois pratique (faciliter le passage) et éthique (prévenir les conflits entre riverains). Ce principe servait ainsi de référence juridique et morale dans la régulation de l'espace commun. Cependant, au-delà de ce seuil de base, la détermination de la largeur des autres types de voies ne se réduisait pas à une norme rigide. Elle relevait d'une marge d'interprétation laissée aux califes ou à leurs représentants, par le biais de l'« *Ijtihad* » (effort d'interprétation). Cette flexibilité permettait d'adapter les règles aux spécificités locales et aux besoins concrets de chaque communauté urbaine. Les décisions pouvaient ainsi varier en fonction des usages, de la densité du tissu urbain ou de l'importance de la voie. Les considérations étaient aussi fonctionnelles et pragmatiques : il s'agissait par exemple de prévoir une largeur suffisante pour permettre le croisement de deux chameaux. Dans certains contextes, d'autres critères pouvaient être pris en compte, comme la nécessité de laisser passer des processions, d'assurer l'écoulement des eaux de pluie, ou encore de permettre l'accès des marchandises aux souks et aux caravanes.

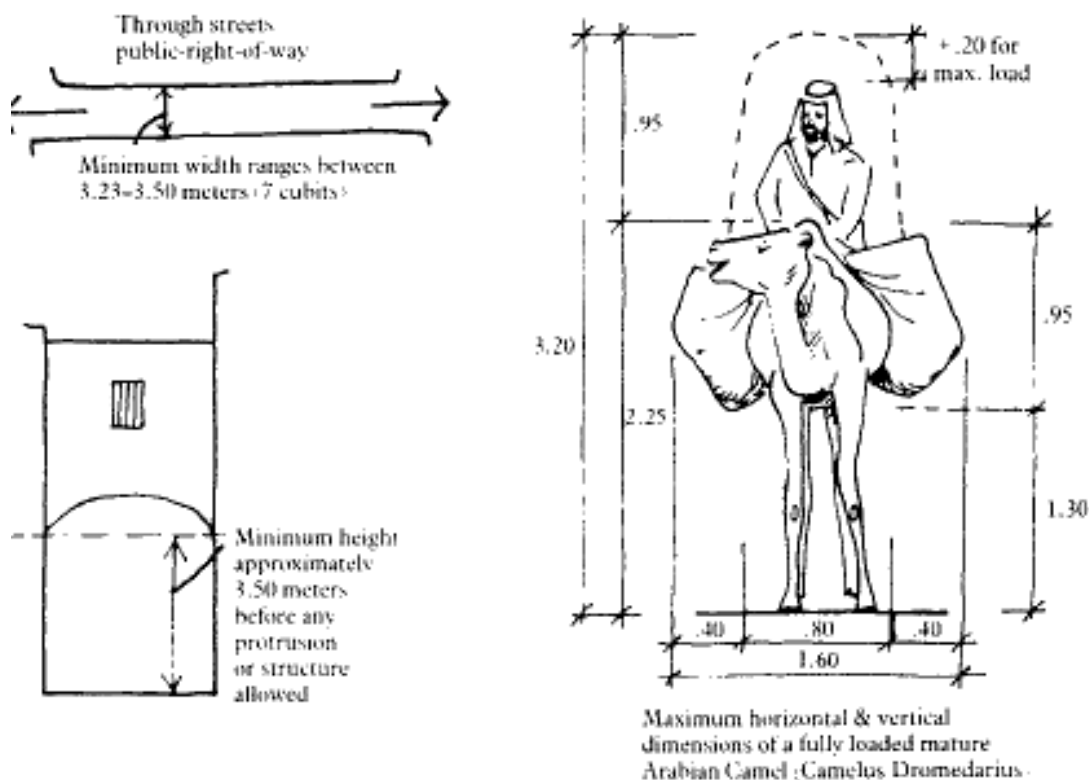


Figure 5.12. Mesure des rues suivant règles juridiques et fonctionnalité. Source : Hakim (1986)

La distinction entre voies publiques et privées constitue un autre aspect essentiel. Akbar (1984, p. 145-155) souligne une distinction fondamentale entre les voies publiques « *Tariq amm* » et les ruelles privées « *zouqag, sikkah, darb* ». Les premières étaient ouvertes à tous, financées et protégées par l'autorité, et leur largeur devait répondre à des critères minimaux fixés par le *fiqh*. Les secondes, en revanche, pouvaient être fermées et appropriées par les habitants riverains. Cette règle permettait à un groupe de voisins de contrôler l'accès à une impasse et d'en réguler l'usage. La privatisation des ruelles avait pour effet de renforcer la cohésion sociale du quartier et d'assurer la sécurité des habitants, tout en produisant des tissus urbains organisés autour de hiérarchies d'accès : de la grande rue publique, ouverte et traversante, à l'impasse semi-privée et surveillée par les habitants. Mortada (2003, p. 111-124) rappelle toutefois que, selon la « *Shariiaa* », les rues publiques appartenaient à la communauté et ne pouvaient pas être appropriées par des particuliers. Il cite l'exemple du calife Omar qui obligea Al Abbas à détruire une construction empiétant sur une rue publique. Dans un autre cas, un Qadi (juge) ordonna la démolition d'un portail érigé à l'entrée d'un cul-de-sac car il limitait l'accès à un espace considéré comme appartenant à tous les habitants du voisinage. Ces témoignages illustrent la vigilance des autorités religieuses et juridiques pour garantir la libre circulation et la fonction collective de l'espace viaire. La rue ne pouvait être ni privatisée ni détournée à des fins personnelles : elle incarnait un bien commun protégé par la loi islamique.

De son côté, Al-Hathloul (1981, p. 149-161) insiste sur le rôle central des règles juridiques islamiques dans la gestion des rues. Le « *fiqh* » définit les droits de passage et protège l'espace public contre les empiétements : il interdit, par exemple, qu'un particulier construise un balcon, un encorbellement ou un escalier sur la voie commune si cela gêne la circulation ou porte atteinte aux droits des passants. De même, la largeur minimale des rues doit être respectée afin de garantir l'accessibilité et la fluidité. La « *Hisba* », à travers l'action du « *Mouhtasib* », assurait concrètement l'application de ces règles : il veillait à ce que les étals des commerçants n'occupent pas abusivement la chaussée, que les constructions n'empiètent pas sur la voie publique, et que les marchés demeurent praticables. Cette régulation démontre que la rue n'était pas seulement un espace de passage, mais un lieu surveillé et protégé par le droit, garantissant l'équilibre entre circulation, commerce et voisinage. Concernant les rues secondaires et les ruelles privées, le « *fiqh* » admettait la possibilité de leur fermeture ou appropriation collective, validée par le « *Ourf* » (coutume). Cette règle illustre la flexibilité du système : la rue n'était pas définie uniquement par sa fonction technique, mais aussi par une dimension sociale et communautaire.

Dans une perspective complémentaire, Akbar (1984, p. 110-128) met en avant l'importance des droits de voisinage « *Houqouq al-jiwar* » dans la régulation de l'espace urbain, en particulier des rues. Ces droits ne se limitaient pas à la relation entre deux maisons mitoyennes, mais s'étendaient à l'ensemble de l'environnement immédiat, incluant les passages, les ruelles et les voies collectives. Les juristes stipulaient que nul ne pouvait causer de préjudice « *Darar* » à ses voisins par des actes tels que le dépôt d'objets encombrants, l'obstruction du passage ou l'édification de structures empiétant sur la voie. La rue était conçue comme un bien commun dont l'usage devait rester libre et équitable, et dont chaque habitant avait la responsabilité de préserver l'accessibilité. Les droits de voisinage concernaient également la protection de la vie privée et de la tranquillité, en interdisant des nuisances visuelles (comme les ouvertures indiscretes sur les demeures voisines) ou sonores (activités perturbatrices). Cette régulation dépassait la simple gestion des flux de circulation : elle faisait de la rue une extension de la sphère résidentielle, insérée dans un cadre juridique qui garantissait l'équilibre entre liberté individuelle et respect collectif. Akbar insiste sur le

fait que, dans ce système, la rue n'était pas seulement un axe de déplacement mais un espace de cohabitation, où l'ordre spatial se construisait à travers des obligations réciproques. C'est pourquoi le réseau viaire islamique se caractérise par des formes hiérarchisées et organiques : les grandes voies publiques étaient ouvertes à tous et protégées par l'autorité, tandis que les petites ruelles pouvaient être fermées ou appropriées par les riverains, transformant ces passages en prolongements semi-privés des maisons. La combinaison entre ces règles juridiques et la responsabilité des habitants explique la genèse d'un tissu urbain complexe, où les impasses, les détours et les passages étroits ne sont pas le signe d'un désordre, mais le résultat direct d'un système de régulation sociale et légale profondément enraciné.

En se concentrant sur l'école juridique malikite, qui couvre Médine, le Maghreb, l'Andalousie et l'Ouest africain, Hentati (2003) analyse la rue comme objet de régulation juridique. Dans la littérature malikite, la rue occupe une place centrale car elle touche à la fois aux droits individuels et aux usages collectifs. Plusieurs « *Hadiths* » constituent une base normative : l'interdiction de nuire (*la darar wa la dirar*), l'exhortation à ôter les obstacles de la voie publique, ou encore la règle bien connue attribuant à la rue une largeur minimale de sept coudées. Ces principes ont été repris, discutés et systématisés par les juristes malikites, qui ont progressivement élaboré une doctrine complète encadrant la rue et, plus largement, le réseau viaire. Ainsi, les principales sources malikites témoignent de cette évolution :

- Le *Mouwattaa* de Malik Ibn Anas, aborde la rue dans le chapitre sur la bienveillance « *qadaa fii al-maarouf* », en insistant sur le respect du voisinage et l'interdiction du dommage.
- La *Moudawwana* de Sahnoun, disperse les cas de jurisprudence dans différents chapitres, privilégiant la notion de « *Darar* » (dommage) plutôt que celle de bienveillance.
- Les *Agwiba* de Mohammed Ibn Sahnoun, constituent l'une des premières tentatives de rassembler les questions relatives à la rue.
- Le *Nawadir wa Ziyadat* d'Ibn Abi Zayd, inclut un véritable *Kitab al-qadaa fi al-bounyan* (Livre de la juridiction de la construction), avec des cas détaillés sur les murs, la mitoyenneté, les passages et les impasses.
- Les œuvres tardives, par exemple : *Tabsirat al-Hukkam* d'Ibn Farhoun, *Jamii al-Ahkam* d'al-Burzulī, *Miiyar al-Mourib* d'al-Wansharissi, montrent que les questions de voirie et d'urbanisme deviennent un champ autonome de réflexion juridique, regroupé sous le thème de la prévention du dommage « *Nafi al-darar* ».

Cette évolution illustre la montée en importance de la rue comme catégorie juridique spécifique, en parallèle avec la complexification progressive de la ville islamique médiévale. Les sources malikites développent également une terminologie précise pour décrire la hiérarchie du réseau viaire. Cette typologie reflète une organisation hiérarchique allant de l'avenue principale ouverte à tous jusqu'à l'impasse privée réservée aux habitants. Elle traduit également une conception sociale de l'espace urbain, où la circulation est reconnue comme un droit, mais hiérarchisé selon le statut juridique et fonctionnel de la rue :

- Rue publique « *Tariq amma, Tariq al-muslimin* », large, passante, inaliénable, destinée à l'usage collectif. Sa largeur minimale est fixée à sept coudées. Elle correspond aux artères principales de la ville.

- Rue privée ou secondaire « *Zouqaq, Zanja* », plus étroite, parfois impasse « *Ghayr nafidha* », pouvant appartenir à un ou plusieurs riverains. Elle pouvait être fermée par une porte pour des raisons de sécurité ou de contrôle social.

4.3. L'empiètement sur la rue, problématique centrale

Si les règles juridiques avaient pour but d'assurer un usage équilibré des rues, la vie quotidienne faisait souvent apparaître des tensions liées aux empiètements sur l'espace public. Ces empiètements pouvaient prendre plusieurs formes : avancées architecturales, étals de commerçants ou rétrécissements volontaires de la voie. Ils constituaient un enjeu majeur dans la gestion du réseau viaire, car ils touchaient directement à la limite entre le droit collectif à circuler librement et la volonté d'appropriation privée. La rue, en droit islamique, n'était pas un espace abandonné, mais un bien commun garanti à tous. Toute extension privée, qu'il s'agisse d'un balcon, d'un escalier, d'un Sabat ou d'un étal, devait donc respecter des conditions précises pour ne pas gêner la circulation ni limiter l'accès équitable. Cette question des empiètements met en lumière le caractère vivant et évolutif de la morphogenèse urbaine islamique. Entre respect des règles collectives et initiatives locales, la rue devenait un lieu de négociation permanente. L'étude de ces pratiques montre comment se jouaient les rapports de force entre autorités, voisinages et individus, et comment ces interactions ont façonné l'organisation particulière du réseau viaire dans les médinas.

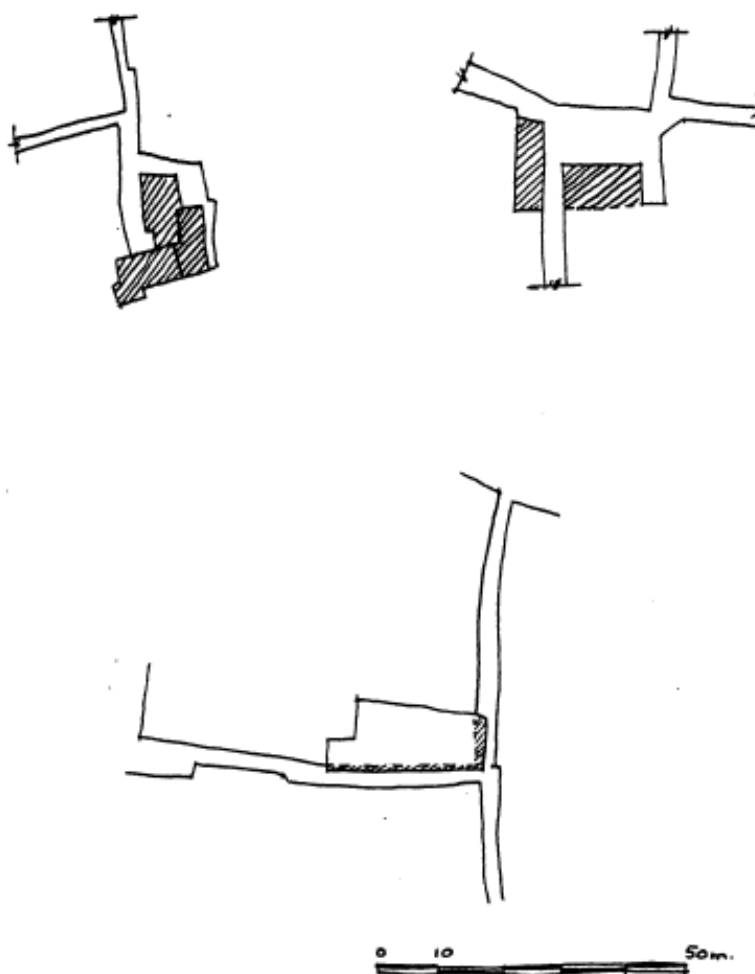


Figure 5.13. Schémas d'empiètement de rues dans les villes islamiques. Source : Al-Hathloul (1981)

Ainsi, au-delà de la norme juridique qui définissait la rue comme un espace collectif protégé, la réalité quotidienne révélait un processus d'appropriation progressive et souvent tolérée. C'est précisément ce que met en évidence Ben Hamouche (2009), en montrant que les rues des villes islamiques traditionnelles n'étaient pas des espaces figés, mais des lieux en constante transformation sous l'effet des habitants. Il souligne que ces rues n'étaient pas des espaces figés, mais des lieux en constante transformation sous l'effet des interventions des habitants. L'un des phénomènes les plus caractéristiques était l'empiètement du bâti sur la rue. Malgré le contrôle exercé par la Hisba, les habitants ajoutaient fréquemment des éléments débordant sur la voie : projections en hauteur, pièces en surplomb, Sabat reliant deux maisons, ou encore marches supplémentaires devant les portes. Ces aménagements, parfois tolérés, parfois contestés, modifiaient progressivement la géométrie initiale des rues et accentuaient leur caractère sinueux et irrégulier. Ben Hamouche décrit ce processus comme une forme d'« osmose » entre les besoins individuels et les contraintes collectives, où la négociation implicite entre propriétaires, voisinages et autorités produisait un tissu viaire en perpétuelle adaptation. Ce jeu de micro-transformations locales illustre parfaitement la dynamique d'auto-organisation de la médina : par l'agrégation de petites initiatives, le réseau viaire se transformait en un paysage marqué par une irrégularité fractale, témoignant de la capacité de la ville islamique à évoluer selon une logique vivante et processuelle.

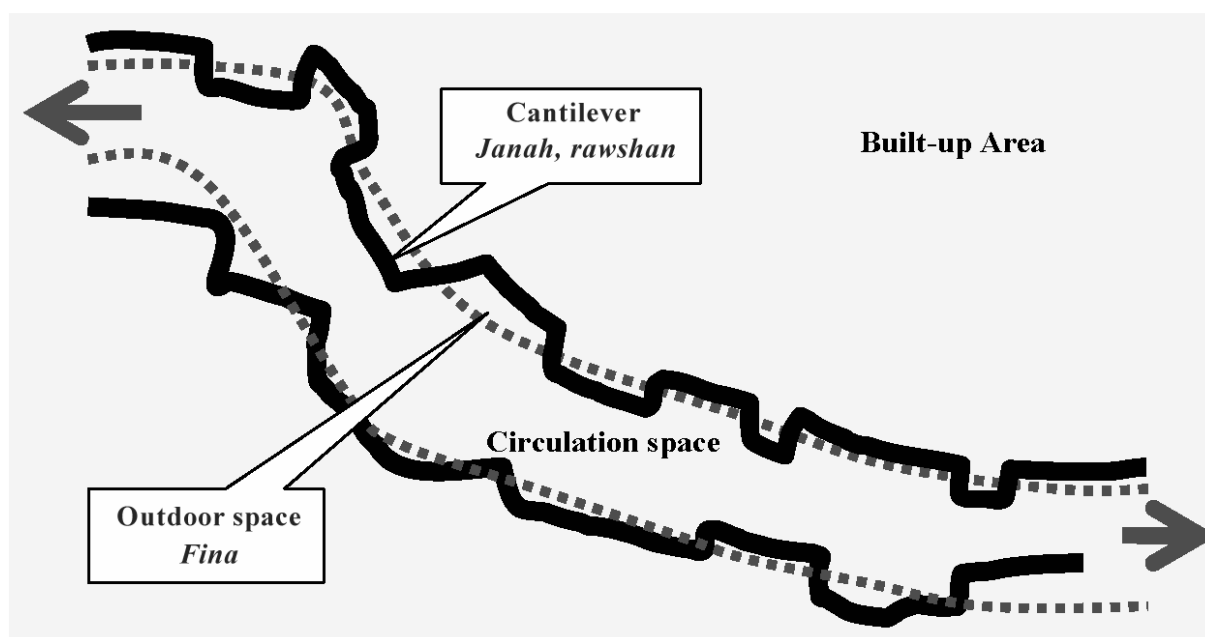


Figure 5.14. Empiètement de rues et dynamique du réseau viaire. Source : Ben Hamouche (2009)

En effet, la question de l'empiètement du bâti sur la rue a suscité un intérêt dans les études orientalistes, mais le plus souvent traitée de façon biaisée et réductrice. Dans une perspective dévalorisante, certains différents chercheurs orientalistes l'interprétaient comme le signe d'une anarchie urbaine, d'un désordre généralisé ou encore d'une absence de règles rationnelles d'aménagement, renforçant ainsi l'image stéréotypée de la ville islamique comme espace chaotique (Van Staëvel, 2002). Pourtant, les études fondées sur l'aspect juridique montrent au contraire que ce phénomène était encadré par un ensemble de règles précises. C'est dans ce sens que Brunschvig (1947), en s'appuyant notamment sur les travaux de l'orientaliste allemand Otto Spies, apporte une lecture plus équilibrée. Contrairement aux interprétations dépréciatives de ses contemporains, il met en évidence le rôle du cadre normatif islamique qui régulaient ces formes d'appropriation partielle de l'espace public.

Brunschvig a ainsi mis en lumière la relation étroite entre pratiques urbanistiques et règles juridiques, montrant que ces transformations s'inscrivaient dans un système bien structuré, appuyé sur les écoles de jurisprudence musulmane. Il évoque en particulier les références malikites appliquées au Maghreb et les avis shaféites en Égypte, montrant que l'empiétement faisait l'objet de débats juridiques élaborés. Loin d'un désordre spontané, il s'agissait donc d'une pratique régulée par le droit islamique *Fiqh*, dans laquelle la *Hisba* et le *Muhtasib* jouaient un rôle essentiel pour maintenir l'équilibre entre intérêts privés et collectifs.

En se concentrant davantage sur l'école malikite, Hentati (2003) souligne que l'empiétement sur la rue publique constituait l'un des thèmes majeurs du *fiqh*. Les exemples les plus fréquents concernent la construction de *Sabat* (passages couverts reliant deux maisons au-dessus d'une rue), l'installation de balcons, d'auvents ou d'étals dans les marchés, ou encore la réduction de la largeur d'une rue pour agrandir une habitation. Ces débats révèlent que la rue était un espace constamment négocié, où les droits individuels entraient souvent en tension avec l'intérêt collectif, et où l'autorité du *Qaḍi* jouait un rôle central d'arbitrage. Les juristes malikites se sont ainsi divisés en deux grandes approches :

- L'approche rigide (Kairouan), elle reposait sur l'interdiction stricte de toute annexion ou construction sur la rue publique. Cette orientation visait à protéger l'intérêt collectif et traduisait un contexte où l'autorité judiciaire veillait particulièrement au maintien de l'ordre urbain.
- L'approche plus souple (Andalousie), elle privilégiait une tolérance de certains empiétements (*Sabat*, étalages, annexions partielles) dès lors qu'ils ne gênaient pas la circulation. Elle traduisait une adaptation aux réalités sociales et une lecture plus flexible des usages urbains.

En résumé, le réseau viaire de la ville islamique traditionnelle n'était pas seulement un système de circulation, mais le résultat d'un équilibre entre règles, usages et transformations quotidiennes. Loin d'être figées, les rues changeaient au fil du temps sous l'effet des habitants, tout en restant encadrées par la *Hisba*. Ces ajustements permanents montrent une véritable morphogenèse urbaine, où la forme de la ville naît des petites actions locales. Ils traduisent aussi le fonctionnement d'un système complexe, fondé sur l'adaptation, l'auto-organisation et l'émergence d'un ordre global à partir d'initiatives locales. Cette organisation complexe et émergente prépare le terrain pour une lecture systémique du réseau, que la théorie des réseaux permet d'analyser en termes de structure, et connectivité.

5. Vers une lecture systémique du réseau viaire selon la théorie des réseaux

Douady (2016, p. 21-23) identifie le réseau viaire comme l'élément urbain le plus stable et pertinent à modéliser, en raison de sa résilience historique, contrairement aux bâtiments ou aux parcelles, qui sont plus susceptibles de changer au fil du temps. Pour simplifier l'analyse, l'accent est mis sur la configuration géométrique du squelette viaire, en laissant de côté les attributs secondaires tels que les trottoirs, le mobilier urbain ou les aménagements temporaires. L'évaluation d'un modèle urbain nécessite l'utilisation d'indicateurs quantitatifs objectifs, notamment ceux issus de l'analyse automatique des réseaux, tels que la connectivité, la continuité et la structure. Ces outils permettent de comparer les formes générées par le modèle avec les structures urbaines réelles. L'étude de cas historiques montre que, malgré les différences culturelles et stylistiques, les réseaux viaires présentent souvent des similitudes, car ils suivent des logiques fonctionnelles et morphologiques comparables.

Ces réseaux conditionnent les usages et influencent le développement futur, créant ainsi un cycle morphogénétique entre forme, usage et extension urbaine.

Dans une perspective complémentaire, Marshall (2005, p. 107-125) montre que les réseaux de rues peuvent être compris non seulement comme des formes géométriques visibles, mais également comme des graphes abstraits, composés de nœuds (intersections) et de liens (tronçons de rues). Cette approche, issue de la théorie des réseaux, permet de révéler la structure relationnelle des rues indépendamment de leur tracé physique, et rend possible la comparaison entre tissus urbains très différents, qu'il s'agisse d'une grille régulière ou d'un réseau organique apparemment irrégulier. Marshall distingue plusieurs types de représentations graphiques : le graphe géométrique, le graphe topologique et les graphes hiérarchiques, chacune offrant une lecture différente du réseau. Un des apports majeurs de cette lecture en graphe est la possibilité d'appliquer des mesures quantitatives. Il cite notamment le degré (nombre de connexions à une intersection), la profondeur topologique (nombre d'étapes entre deux rues) et la centralité (importance structurelle d'une rue dans l'ensemble du réseau). Ces indicateurs montrent que, même dans un réseau organique, certaines rues acquièrent une place structurante en raison de leur centralité, sans avoir été planifiées comme artères principales. Autrement dit, la hiérarchie urbaine peut émerger progressivement, comme produit d'une morphogenèse incrémentale, plutôt que d'un plan préétabli. Les réseaux organiques, tels que ceux des médinas, semblent désordonnés à première vue, mais une analyse topologique révèle des logiques mesurables de connectivité et de profondeur. À l'inverse, une grille régulière présente une faible profondeur et de nombreuses alternatives d'itinéraires, tandis qu'une arborescence se caractérise par une grande profondeur et peu de chemins de substitution.



Figure 5.15. Fragment urbain et son graphe spatial. Source : Marshall (2005)

Dans la continuité de l'analyse de Marshall sur la lecture des réseaux viaires en tant que graphes abstraits, Hachi (2020, p. 174–190) souligne que cet outil est particulièrement pertinent pour analyser les transformations morphologiques et en comprendre les effets sur l'accessibilité des usagers. Toutefois, les graphes restent une représentation du réseau réel, et non sa reproduction exacte. Leur construction repose sur des données vectorielles issues de plans ou de relevés cartographiques, impliquant plusieurs choix méthodologiques : délimitation de l'aire d'étude, simplification de certaines continuités ou pondération des tronçons selon leurs caractéristiques. Ces choix, situés à l'interface entre précision empirique et contraintes de modélisation, influencent directement les résultats et doivent être pris en compte dans l'interprétation pour éviter des conclusions biaisées. Malgré ces précautions, la lecture en graphe demeure un outil puissant pour étudier la morphologie urbaine, permettant de calculer des indicateurs traduisant les conditions d'accessibilité et facilitant la comparaison

entre réseaux quadrillés, organiques ou arborescents. Cependant, cette approche présente certaines limites : elle tend à simplifier et parfois déformer la réalité urbaine, en ignorant des dimensions qualitatives telles que la hiérarchie symbolique des rues ou leur valeur identitaire. C'est pourquoi il est nécessaire d'insister sur la complémentarité des approches : la lecture en réseau qualitative et la lecture en graphe quantitative doivent être combinées pour saisir à la fois la matérialité, la dimension sociale et la structure relationnelle des espaces urbains.

. Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif d'analyser la rue et le réseau viaire comme éléments structurants et supports méthodologiques de la morphogenèse urbaine. L'étude a montré que ces composantes vont bien au-delà de leur fonction de circulation : elles organisent l'espace de la ville, structurent les quartiers et influencent les dynamiques de croissance. Dans la ville islamique traditionnelle, le réseau viaire obéit à une logique interne cohérente, souvent guidée par les principes de la loi islamique. La hiérarchie des rues, ruelles et impasses, leur orientation et leur capacité à articuler espaces publics et privés reflètent des règles de sociabilité, de vie communautaire et de respect des limites de propriété. Cette organisation minutieuse permet de prévenir les empiètements sur les espaces publics et privés, garantissant une lisibilité et une cohérence du tissu urbain. Loin d'être un désordre, ce réseau témoigne d'un processus morphogénétique incrémental : les rues principales, secondaires et impasses se mettent en place progressivement, tout en respectant les principes de proximité, d'intimité et de flexibilité prônés par la tradition urbaine islamique. La rue devient ainsi un support de mobilité, un espace social et un instrument d'organisation de l'espace, combinant fonctionnalité, régulation des empiètements et cohérence sociale.

Cette complexité, difficile à saisir avec les seules méthodes géométriques classiques, invite à utiliser des outils analytiques adaptés. La théorie des réseaux permet de mettre en évidence la hiérarchie des rues, les centralités et les régularités cachées dans l'irrégularité apparente des médinas. Cet outil montre que l'organisation des rues reflète contraintes et principes islamiques, générant une cohérence fonctionnelle et sociale. En somme, ce chapitre a montré que la rue et le réseau viaire ne sont pas seulement des structures physiques : ils sont également un support méthodologique pour analyser la morphogenèse urbaine dans le cadre de la complexité. Cette lecture intégrée, combinant aspects structurels, sociaux et normatifs, prépare le terrain pour les chapitres suivants, qui approfondiront l'usage des fractales, de la théorie des réseaux et des études empiriques sur les villes algériennes.

. Notes et références bibliographiques

Hachi, R. (2020). *Explorer l'effet de la morphologie des réseaux viaires sur leurs conditions d'accessibilité : Une approche empirique fondée sur la théorie des graphes* [Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne].

Caliskan, O. (2013). *Pattern formation in urbanism: A critical reflection on urban morphology, planning and design* [Thèse de doctorat, Technische Universiteit Delft].

Marshall, S. (2005). *Streets & patterns* (e-book edition). Taylor & Francis e-Library.

Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude : Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste* [Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d'Azur, Nice].

Oliveira, V. (2016). *Urban morphology: An introduction to the study of the physical form of cities* (ebook ed.). Cham: Springer.

Merlin, P., et Choay, F. (Éds.). (1996). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement* (2^e éd.). Paris : Presses Universitaires de France - PUF.

Choay, F. (1965). *L'urbanisme : Utopies et réalités. Une anthologie*. Paris : Éditions du Seuil.

Choay, F. (2009). *Le patrimoine en questions : Anthologie pour un combat*. Paris : Seuil.

Clair, É. (2014). *Réconcilier ville et voirie ou l'enjeu d'un rapprochement entre mobilité et urbanité : dynamiques et perspectives sur le réseau viaire structurant de Bourg-en-Bresse* [Thèse de doctorat, Université de Lyon].

Brès, A. (1998). Le système des voies urbaines : entre réseau et espace. *Flux*, 34(4), 4-20.
<https://doi.org/10.3406/flux.1998.1225>.

Barles, S. (2011). Les villes transformées par la santé, XVIIIe-XXe siècles. *Les Tribunes de la santé*, 33(4), 31-37. <https://doi.org/10.3917/seve.033.0031>.

Le Corbusier. (1994). *Urbanisme*. Paris : Flammarion. (Œuvre originale publiée en 1925, coll. « L'Esprit Nouveau »)

Le Corbusier. (1971). *La Charte d'Athènes* (Rééd. de l'éd. originale de 1943). Paris : Éditions du Seuil.

Frampton, K. (1983). Towards a Critical Regionalism: Six Points for an Architecture of Resistance. In H. Foster (Ed.), *The Anti-Aesthetic: Essays on Postmodern Culture* (pp. 16-30). Winnipeg : Bay Press.

Jacobs, J. (1991). *Déclin et survie des grandes villes américaines* (Trad. de l'anglais). Liège : Mardaga. (Œuvre originale publiée en 1961 sous le titre *The Death and Life of Great American Cities*)

Alexander, C. (1965). A city is not a tree. *Architectural Forum*, 122(1), 58-62.

Krier, R. (1978). Typological and morphological elements of the concept of urban space (Vol. 49). *Architectural Design Magazine*.
https://openlibrary.org/works/OL33073830W/Typological_and_morphological_elements_of_the_concept_of_urban_space.

Gehl, J. (1971). *Life between buildings: Using public space*. Copenhagen : Arkitektens Forlag.

Dupuis, B. (2009). Le mouvement du New Urbanism et le paysage urbain : La circulation d'une doctrine urbanistique. *Articulo - Journal of Urban Research*, (Special issue 2). <https://doi.org/10.4000/articulo.1133>.

Cozens, P., et Hillier, D. (2008). The shape of things to come: New urbanism, the grid and the cul-de-sac. *International Planning Studies*, 13(1), 51-73.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13563470801969962>.

Choay, F. (1996). *La règle et le modèle : Sur la théorie de l'architecture et de l'urbanisme*. Paris : Éditions du Seuil.

Benevolo, L. (2000). Histoire de la ville (Rééd. de l'éd. orig. 1983). Paris : Parenthèses.

Kostof, S. (1991). *The city shaped: Urban patterns and meanings through history*. London : Thames & Hudson.

Douady, C.-N. (2014). *De la trace à la trame : La voie, lecture du développement urbain*. Paris : L'Harmattan.

Frankhauser, P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Paris : Anthropos (collection « Villes »).

Southworth, M., et Ben-Joseph, E. (1995). Street standards and the shaping of suburbia. *Journal of the American Planning Association*, 61(1), 65-81. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01944369508975620>.

- Nilsson, L., et Gil, J. (2019). The signature of organic urban growth. In L. D'Acci (Ed.), *The mathematics of urban morphology* (pp. 95–110). Cham : Birkhäuser.
- Al-Hathloul, S. (1981). *Tradition, continuity and change in the physical environment: The Arab-Muslim city*. [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].
- Mortada, H. (2003). *Traditional Islamic principles of the built environment* [eBook edition]. Routledge.
- Akbar, J. A. (1984). *Responsibility and the traditional Muslim built environment* [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].
- Hakim, B. S. (1986). *Arabic Islamic cities: Building and planning principles*. London: Routledge.
- Hentati, N. (2003). La rue dans la ville de l'Occident musulman médiéval d'après les sources juridiques malikites. *Arabica*, 50(3), 273-305. Brill. <https://www.jstor.org/stable/4057631>.
- Ben Hamouche, M. (2009). Can chaos theory explain complexity in urban fabric? Applications in traditional Muslim settlements. In K. Williams (Ed.), *Nexus network journal* (Vol. 11, No. 2). Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8976-5_6.
- Van Staëvel, J.-P. (2002). Les fondements de l'ordre urbain dans le monde arabe médiéval : Réflexions à propos de Cordoue au X^e siècle. *Géocarrefour*, 77(3), 225-234. <https://doi.org/10.3406/geoca.2002.2747>.
- Brunschvig, R. (1947). Urbanisme médiéval et droit musulman. *Revue des Études Islamiques*, 15, 125-155.
- Douady, C.-N. (2016). *La ville comme processus : Derrière la forme urbaine, quelle dynamique ? Essai*. Paris : L'Harmattan.

Chapitre 6 : Fractales et morphogenèse urbaine, modèle de la complexité

« Au fur et à mesure que le temps passe, il devient de plus en plus évident que les règles qu'un mathématicien trouve intéressantes sont les mêmes que celles que la nature a choisies. »

Paul Dirac

« Bien que la spécialisation soit un trait nécessaire de notre civilisation, elle doit être complétée par l'intégration d'une pensée qui traverse les disciplines. Un obstacle permanent s'opposant à cette intégration est la ligne de démarcation entre ceux pour qui l'usage des mathématiques est chose aisée et les autres »

Murray Gell-Mann

. Introduction

La compréhension de la morphogenèse urbaine, développée dans le chapitre 2, suppose de dépasser les approches classiques, statiques ou purement descriptives de la forme. Elle appelle une lecture dynamique, processuelle et évolutive de la ville, considérée comme le produit d'interactions multiples entre agents, contextes et échelles. Cette approche met en évidence des processus itératifs, de transformation continue et de différenciation, par lesquels les formes urbaines se construisent et se reconfigurent dans le temps. Ces logiques de transformation trouvent une assise théorique et épistémologique dans les concepts des théories de la complexité, explorées au chapitre 3. Celles-ci permettent d'envisager la ville comme un système complexe, caractérisé par l'auto-organisation, l'émergence, et les rétroactions. Elles proposent un cadre de pensée apte à rendre compte de la dynamique propre des formes urbaines, de leur diversité et de leur capacité à se structurer.

Dans la continuité de cette double perspective, morphogenèse urbaine et complexité, ce chapitre introduit un outil et un modèle formel central : la géométrie fractale. Élaborée par Benoît Mandelbrot dans la fin des années 1960. La géométrie fractale offre un langage pour décrire des formes irrégulières, discontinues, arborescentes ou imbriquées, des caractéristiques que l'on retrouve dans les tissus urbains. Les fractales ne sont pas seulement des objets géométriques, mais elles traduisent aussi une logique profonde de génération formelle, qui en font un modèle privilégié pour penser la formation des structures naturelles et par extension urbaines. L'intérêt des fractales en études urbaines et architecturales réside précisément dans leur capacité à relier forme et processus. En cela, elles prolongent et incarnent l'approche morphogénétique : elles traduisent dans un langage mathématique les logiques génératives que les villes manifestent dans l'espace. Leur structure hiérarchique, leur irrégularité et leur multi-échelle en font des outils particulièrement pertinents pour comprendre la complexité formelle des villes, notamment les villes islamiques traditionnelles étudiées dans la thèse présente.

Ce chapitre propose donc d'examiner les fondements historiques, théoriques et épistémologiques de la géométrie fractale et d'explorer ses principales caractéristiques : autosimilarité, dimension fractale, invariance d'échelle. Il retracera ensuite ses applications à l'analyse urbaine et architecturale. Enfin, une attention particulière sera portée à la fractalité dans les formes architecturales et urbaines islamiques traditionnelles, souvent générées à partir de règles locales simples, répétées, et agencées selon une logique autoorganisée. L'objectif de ce chapitre est de montrer que les fractales ne constituent pas un simple motif géométrique ou une curiosité mathématique, mais bien un modèle opératoire permettant

d'analyser, de comprendre la ville en tant que système complexe, en articulant la forme et le processus dans une perspective multi-échelle.

1. Fondements des fractales, histoire et cadre conceptuel

Dans ce qui suit, nous examinerons les fondements historiques de la géométrie fractale, depuis sa formalisation par Benoît Mandelbrot dans les années 1960 jusqu'à ses principales évolutions conceptuelles. Nous reviendrons sur la remise en cause de la géométrie classique qui a conduit à l'élaboration d'un outil capable de représenter l'irrégularité, la discontinuité et la hiérarchie observées dans de nombreux phénomènes naturels, là où les modèles euclidiens montraient leurs limites. Nous préciserons également l'étymologie du terme fractal et les notions clés associées, afin d'établir un socle conceptuel commun. Cette mise en perspective permettra de comprendre comment les fractales se sont imposées comme un langage de la complexité et pourquoi elles offrent un cadre opératoire particulièrement pertinent pour analyser et modéliser la morphogenèse des formes urbaines.

1. 1. Historique et terminologie

En 1967, le mathématicien Benoît Mandelbrot rencontra des difficultés pour mesurer la longueur de la côte (géographique) britannique. L'une des causes principales était la forme irrégulière de la côte. Il découvrit que la longueur de la côte varie en fonction de l'échelle de mesure (c'est-à-dire, du petit au grand, comme illustré à la figure 6.1). Confronté à cette difficulté, Mandelbrot proposa un nouveau cadre géométrique et introduisit le concept de géométrie fractale. Ainsi, il définit une fractale comme un objet mathématique, naturel ou artificiel, caractérisé par une structure irrégulière, rugueuse ou fragmentée, répétée à toutes les échelles (1967 ; 1982). Il déclara : « *...les nuages ne sont pas des sphères, les montagnes ne sont pas des cônes, les côtes ne sont pas des cercles, l'écorce n'est pas lisse, et la foudre ne suit pas une ligne droite ... La nature ne montre pas simplement un degré plus élevé mais un niveau complètement différent de complexité... l'existence de ces structures nous oblige à étudier ces formes qu'Euclide a négligé...* ». Il souligna par conséquent que les formes euclidiennes ne sont que des cas singuliers dans un univers de formes fractales. Les formes fractales sont la règle, les formes euclidiennes l'exception.

Selon Gleick (2011, p. 95-98), c'est par un après-midi d'hiver en 1975 que Mandelbrot, cherchant un mot pour nommer sa découverte, il tomba sur le mot latin « *fractus* », dérivé du verbe « *frangere* », signifiant briser. Il trouva que ce terme, lié aux mots anglais « *fracture* » et « *fraction* », exprimait parfaitement l'idée. Ainsi naquit le mot fractal, en tant que nom et adjectif, en anglais comme en français. Ce terme évoque l'irrégularité et la fragmentation, deux propriétés essentielles de ces objets. Mandelbrot montra que de nombreux motifs naturels, souvent considérés comme désordonnés ou amorphes, pouvaient être décrits avec précision grâce à la géométrie fractale. Cette approche permet d'étudier des formes que la géométrie classique ignorait, en les qualifiant de sans forme ou morphologiquement amorphes. De ce fait, la contribution de Mandelbrot redéfinit des formes longtemps jugées indéfinissables, en les rendant mesurables, visualisables et porteuses d'un ordre inscrit dans le désordre.



Figure 6.1. Schématisation du calcul de la côte britannique par l'approche fractale selon Mandelbrot. Source : <https://www.discovermagazine.com/the-sciences/fractals>, consulté en Décembre 2024

En effet, la géométrie fractale trouve ses racines dès la fin du XIXe siècle, à un moment où les fondements de la géométrie classique sont remis en question. Les mathématiciens découvrent alors des figures étranges comme l'ensemble de Cantor en 1883, la courbe de Peano en 1890 ou le flocon de Koch en 1904, présentées dans la figure 6.2. Bien que définies rigoureusement, ces formes sont discontinues, non dérivables, et présentent des propriétés paradoxales, comme une longueur infinie dans un espace fini. À l'époque, des mathématiciens comme Poincaré ou Jordan les considèrent comme de simples curiosités sans valeur scientifique (Debnath, 2006). Pourtant, ces objets, qualifiés de monstres, ouvrent la voie à une nouvelle manière de penser la forme et l'espace. Mandelbrot représente un tournant en donnant un sens nouveau aux fractales. Il ne se contente pas de les théoriser, mais les applique à des objets concrets comme les côtes, les arbres, les nuages ou les marchés financiers. Cette approche transforme la perception des formes naturelles et géographiques. Autrement dit, ce qui paraissait marginal devient un outil central pour représenter la complexité du monde : il s'agit d'une véritable grammaire de l'irrégularité, essentielle pour comprendre les formes naturelles et urbaines (Dauphiné, 2011, p.10).

Par contraste, Barnsley (2014, p. 1-2) affirme que la géométrie fractale constitue une extension naturelle de la géométrie classique, plutôt qu'une rupture. Il explique que la géométrie euclidienne sert efficacement à concevoir les objets techniques comme les roues, maisons, circuits et à fournir une première approximation des formes physiques. En revanche, elle échoue à représenter la complexité des formes naturelles, telles que les nuages, les fougères, les montagnes ou les galaxies. C'est là que la géométrie fractale entre en jeu : elle permet de modéliser avec précision des objets apparemment irréguliers, en révélant leurs structures autosimilaires. Barnsley insiste sur le fait que la géométrie fractale est un nouveau langage scientifique, capable de décrire les formes naturelles aussi rigoureusement que l'architecte décrit une maison. Cette extension géométrique modifie profondément notre manière de percevoir le monde, en remplaçant l'approximation grossière par une modélisation

fine de la complexité. Adopter la géométrie fractale, c'est changer de regard sur le réel, en découvrant une organisation profonde là où il n'y avait que chaos apparent.

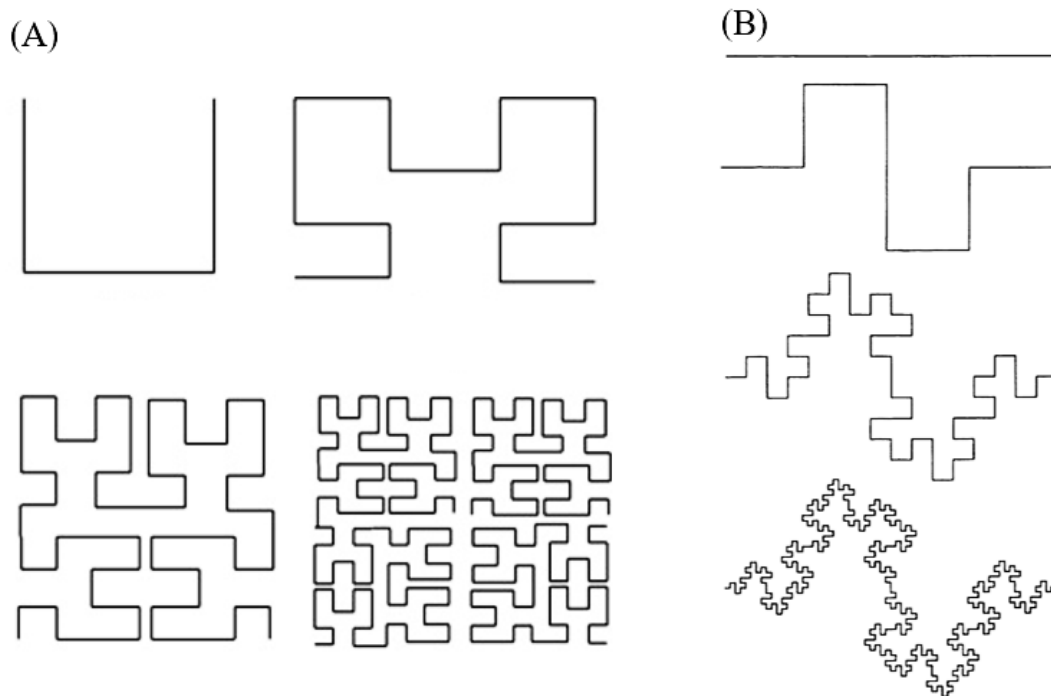


Figure 6.2. Figures fractales originales : (A) Courbe de Peano ; (B) Courbe de Minkowski. Source : <https://www.sciencedirect.com/topics/mathematics/fractal-curve>, consulté en Décembre 2024.

Mandelbrot (1982), en posant les fondements des fractales, les a définies selon un spectre large : depuis des descriptions simples comme des formes irrégulières qui se répètent à différentes échelles jusqu'à des formulations mathématiques rigoureuses, comme la définition d'une fractale par une dimension de Hausdorff-Besicovitch supérieur à la dimension topologique. Il en propose aussi une lecture philosophique : les fractales sont une manière de voir l'infini. Cette diversité d'interprétations a ouvert la voie à de nombreuses définitions selon les registres disciplinaires. Barnsley (2014, p. 2-5), par exemple développe une définition à la fois conceptuelle et mathématique. Il affirme que les fractales constituent un langage de la nature, capable de modéliser des formes naturelles complexes. Il les décrit comme des sous-ensembles d'un espace, souvent compact, mais d'une grande complexité géométrique. Il insiste sur leur structure relationnelle : « *elles ne se décrivent pas point par point, mais par les interactions entre les parties, produisant une forme globale émergente* ». Pour Barnsley, le terme fractal n'a pas encore de statut mathématique rigide : « *il s'agit d'un concept opératoire plus que d'un objet formel unique* ». De son côté, Gleick (2011, p. 94-97) souligne le caractère paradoxal des fractales : « *Ce sont des formes qui révèlent toujours plus de détails à mesure qu'on les explore, sans jamais atteindre de fin. Contrairement aux formes lisses et régulières de la géométrie euclidienne, les fractales sont irrégulières, fragmentées et autosimilaires : chaque partie ressemble au tout, quelle que soit l'échelle. Là où la géométrie classique décrit l'idéal, les fractales capturent la rugosité du réel. Ce qui en fait des outils essentiels pour représenter les objets complexes du monde naturel* ».

Parallèlement, Falconer (2003, p.1-3) confirme qu'il n'existe pas de définition mathématique unique d'une fractale, mais plutôt une caractérisation fondée sur un ensemble de propriétés typiques. Il affirme qu'une fractale est généralement un ensemble géométrique possédant une structure fine à toutes les échelles, trop irrégulière pour être décrite par les outils de la géométrie classique, et qui présente une certaine forme d'autosimilarité, qu'elle soit exacte, approchée ou statistique. Il souligne ainsi l'intérêt d'une approche souple, préférant voir dans une fractale un ensemble présentant plusieurs de ces propriétés, souvent définies par des règles simples et récursives. Cette souplesse permet d'inclure un large éventail d'objets naturels et mathématiques dans le champ de la géométrie fractale. Dans le même sens, Dauphiné (2011, p.2) définit une fractale comme une forme irrégulière, fragmentée, qui présente une autosimilarité sur plusieurs échelles. Il précise que, pour qu'un phénomène soit qualifié de fractal, il doit réunir trois caractéristiques : une irrégularité géométrique, une autosimilarité (c'est-à-dire une structure répétée identique ou transformée), et une invariance d'échelle mesurable par la dimension fractale. Ces critères établissent une grille d'analyse applicable à une diversité de formes complexes. Enfin, Eglash (1999, p.8-19) propose une définition élargie, soulignant qu'une fractale est une forme contenant des motifs similaires se répétant à des échelles progressivement plus petites. Il en identifie quatre propriétés caractéristiques : le « *scaling* » (changement d'échelle), la « *recursion* » (récursivité), l'« *infinity* » (infinité potentielle) et la dimension fractale. Ce qui distingue son approche, c'est l'insistance sur le fait que dans les pratiques culturelles africaines, les motifs fractals sont souvent approximativement autosimilaires, et générés par des règles récursives, sans nécessairement répondre aux critères rigides des mathématiques modernes. Ainsi, cette définition ouvre la voie à une compréhension plus inclusive et interculturelle de la géométrie fractale, reliant les concepts mathématiques à des objets culturels, architecturaux et symboliques issus de traditions non occidentales.

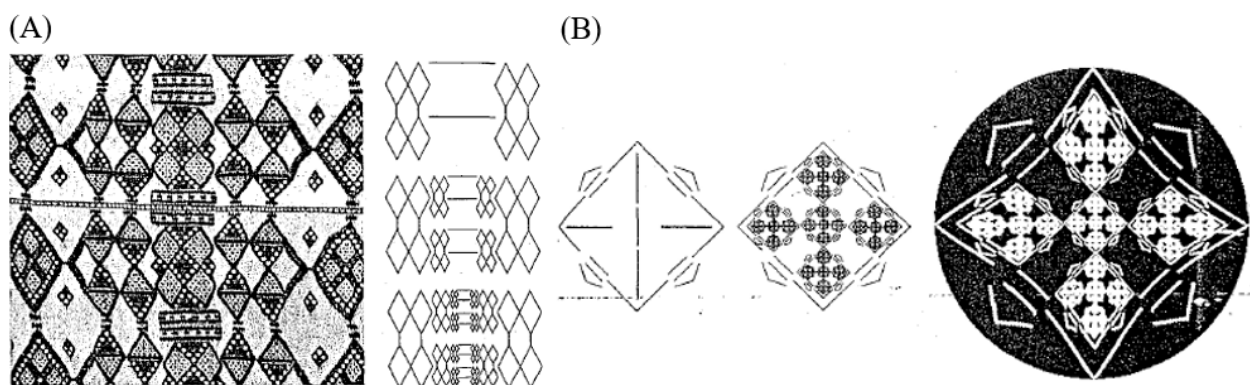


Figure 6.3. Fractales dans les arts africains : (A) tapisserie ; (B) Poterie. Source : Eglash (1999).

1.2. Fractales, cadre conceptuel et paradigme de la complexité

Au-delà d'être un outil mathématique pour représenter des formes irrégulières et des structures multi-échelles, la géométrie fractale a profondément transformé la façon de comprendre et de modéliser les formes (Mandelbrot, 1982, p. 34-35). Cette approche étend la tradition euclidienne, qui depuis des siècles reposait sur l'étude de figures régulières, simples à mesurer et à décrire à l'aide de règles géométriques classiques. La vision euclidienne

privilégie les formes ordonnées et symétriques, tandis que la géométrie fractale s'intéresse aux motifs complexes et irréguliers présents dans la nature. (Gleick, 2011). Ce changement de perspective montre que l'irrégularité, loin de représenter de simples anomalies, exprime souvent le principe même de l'organisation observée. Dans cette optique, la géométrie fractale a inauguré un langage apte à décrire aussi bien le tracé sinueux des côtes maritimes que la forme changeante des nuages, la ramification des arbres ou la morphologie des villes (Frankhauser, 1994, p.41).

En effet, les fractales prennent tout leur sens lorsqu'elles sont replacées dans un cadre conceptuel et épistémologique plus large : celui de la complexité. Ce paradigme, propose de dépasser les approches réductionnistes pour rendre compte des systèmes dont le comportement résulte d'interactions multiples et difficilement prévisibles. Dans cette perspective, Mitchell (2009, p. 49-54) inscrit les fractales au cœur du paradigme de la complexité en les présentant comme un exemple clair de la manière dont des règles locales simples peuvent engendrer des formes globales d'une grande richesse, incarnant ainsi le principe d'émergence. Leur autosimilarité à différentes échelles reflète l'invariance d'échelle observée dans de nombreux systèmes complexes naturels et alimente la recherche de lois universelles capables de décrire des phénomènes transcendant les frontières disciplinaires. Par conséquent, les fractales ne sont pas seulement un objet mathématique, mais un outil conceptuel et visuel qui résume les fondements de la complexité et qui permet de reconnaître dans le monde réel l'ordre caché au sein des différents systèmes. En plus, les fractales offrent selon Theise (2023, p. 26-27), un outil précieux pour visualiser comment des interactions élémentaires peuvent, au fil du temps, engendrer des motifs à la fois réguliers dans leur structure et irréguliers dans leurs détails. Les fractals se caractérisent par des processus évolutifs qui se déploient dans le temps. Cependant, même si des formes fractales se manifestent dans certains aspects biologiques (réseaux vasculaires, structure des poumons, motifs électriques du cœur...) elles ne suffisent pas à rendre compte du comportement global des systèmes vivants : elles expliquent certaines structures ou dynamiques partielles, mais comprendre pleinement les propriétés émergentes, adaptatives et imprévisibles de la vie requiert d'entrer dans le paradigme de la théorie de la complexité.

Dans le cadre des théories de la complexité, les fractales se révèlent particulièrement adaptées à l'étude des villes. En incarnant les principes d'auto-organisation, d'émergence et de rétroaction, elles montrent comment des formes complexes et diversifiées peuvent naître de règles simples appliquées de manière itérative. En articulant l'échelle micro (agents, interactions locales) et l'échelle macro (structure urbaine globale), les fractales offrent un langage commun permettant d'analyser la complexité des systèmes urbains (Batty, 2005, p.4-5). Belmaceda et Fuentes (2016) présente les fractales comme modèle de la complexité en soulignant que l'invariance d'échelle propre aux fractales fait d'elles un pont conceptuel crucial pour étudier les villes comme systèmes complexes, où cette géométrie constitue un outil de mesure décrivant leur organisation spatiale et fonctionnelle. De son côté, Fusco (2018, p.102-109) confirme que les fractales, en tant qu'outil d'analyse, cadre conceptuel et illustration du paradigme de la complexité, traduisent l'auto-organisation et la hiérarchie multi-échelles des formes urbaines, où ordre et désordre coexistent. La fractalité offre un

langage géométrique alternatif à la géométrie euclidienne, capable de relier mesures empiriques (dimensions fractales, lois de puissance) et interprétations des processus morphogénétiques (croissance, interactions locales, émergence de structures globales). Dans la perspective de la pensée complexe, elle incarne un paradigme opératoire pour comprendre et intervenir sur la morphologie des villes.

Le changement de perspective introduit par les fractales ne s'est pas limité aux mathématiques, mais il a profondément influencé une variété de domaines scientifiques. Selon Dauphiné (2003, p. 178), son emploi s'est largement diffusé et développé rapidement dans divers champs d'étude. Les recherches tendent à explorer la diversité des formes fractales, leurs multiples manifestations, les applications en traitement d'image, en simulations numériques, ainsi que les interprétations théoriques qui en découlent. Par exemple, en physique, les fractales ont permis de modéliser la rugosité des côtes, la structure complexe des nuages ou la distribution fractale des galaxies (Vicsek, 1992 ; Turcotte, 2012). En biologie, elles sont employées pour analyser la croissance des organismes et la ramification des réseaux vasculaires (West et al., 1997 ; Goldberger et al., 2002). En géographie et urbanisme, les fractales offrent un cadre théorique et méthodologique pour comprendre l'organisation spatiale des villes, leur expansion, ainsi que les interactions entre leurs multiples échelles morphologiques et fonctionnelles (Batty et Longley, 1994 ; Frankhauser, 1994).

Sur le plan épistémologique, les fractales peuvent être considérées sous plusieurs statuts complémentaires, qui traduisent la richesse conceptuelle et leur pouvoir explicatif dans la compréhension des formes complexes :

- Modèle formel, les fractales sont d'abord un modèle mathématique permettant de représenter et de générer des formes complexes par des règles itératives simples. Basili (1998) souligne que les fractales modélisent des processus génératifs et transformationnels à travers des outils tels que les systèmes de fonctions itératives « *IFS* » les « *L-systems* », ou encore les modèles d'agrégation limitée par diffusion « *DLA* ». Ces modèles permettent de simuler la croissance de structures naturelles telles que les branches des plantes, et les formes urbaines. Ainsi, les fractales offrent un cadre rigoureux pour comprendre la formation dynamique de formes irrégulières et complexes.
- Outil descriptif, au-delà de la génération, les fractales servent également d'outil quantitatif pour décrire et comparer la complexité morphologique des structures observées dans la nature ou les systèmes urbains. Par exemple, la dimension fractale, mesure la densité ou la rugosité des formes à différentes échelles. Cette mesure permet d'évaluer l'irrégularité, la hiérarchie spatiale, ou la fragmentation, constituant un langage commun pour étudier des objets hétérogènes (Frankhauser, 1994, p.138-140). La dimension fractale est devenue une métrique essentielle en géographie, et en urbanisme, pour caractériser des patterns complexes.
- Métaphore scientifique, les fractales ont également été utilisées comme un outil métaphorique pour repenser la complexité, en associant une régularité locale à une

organisation globale émergente. Selon Gleick (2011, p. 228), la géométrie fractale offre une manière visuelle et intuitive de conceptualiser les phénomènes issus de processus autoorganisés. Cette métaphore va au-delà des mathématiques strictes pour s'inscrire dans une approche plus large, où les fractales représentent les dynamiques multi-échelles. Cette approche métaphorique, voir analogique dans différents exemples concernait plus les sciences sociales où les fractales représentaient des phénomènes sociaux (Wagner, 1991 ; Mosko, 2009). Cependant, plusieurs chercheurs en sciences de la complexité alertent sur les limites de l'interprétation simpliste des fractales. Bien que celles-ci illustrent des formes émergentes issues de processus dynamiques, l'analogie ne doit pas être considérée comme une explication exhaustive. En effet, la métaphore, risque aussi de masquer la diversité des mécanismes sous-jacents et la multi-dimensionnalité des phénomènes étudiés. Réduire la complexité d'un système à une simple représentation fractale peut conduire à une vision partielle, voire trompeuse, en négligeant d'autres facteurs dynamiques essentiels à la compréhension globale. (Sokal et Bricmont, 1998 ; Cilliers, 1998 ; Oswald, 2009).

Conséquemment, les fractales apparaissent bien plus qu'un simple outil mathématique : elles offrent une nouvelle manière de penser la forme, l'espace et l'organisation du réel. Pour approfondir cette notion, il est nécessaire d'examiner en détail les caractéristiques fondamentales qui définissent les objets fractals, telles que l'autosimilarité, l'invariance d'échelle ou la dimension fractale, une analyse qui sera développée dans la section suivante. Cependant, il convient d'abord de replacer les fractales dans un cadre théorique et épistémologique plus large, celui des théories de la complexité, car elles ne sont pas seulement des objets formels, mais traduisent aussi des processus dynamiques d'émergence, d'auto-organisation et de hiérarchisation. Comprendre leur rôle dans cette perspective permet d'en saisir toute la portée dans l'étude des formes urbaines, notamment à travers le prisme de la morphogenèse urbaine. La géométrie fractale, constitue un cadre conceptuel reliant forme, processus et complexité, ouvrant de nouvelles voies pour comprendre les villes. Elle permet de saisir l'irrégularité, la hiérarchie et l'auto-organisation du réel à travers un langage formel.

2. Caractéristiques des fractales

Après avoir posé les fondements théoriques, historiques et conceptuels des fractales, ainsi que leur rôle central dans l'analyse de l'irrégularité, de la hiérarchie et de l'auto-organisation des formes naturelles et urbaines, il est désormais pertinent d'en examiner plus en détail les propriétés caractéristiques. Dans cette perspective, Dauphiné (2011, p. 10) souligne qu'il n'existe pas de définition unique et rigoureuse d'une fractale, mais plutôt un ensemble de traits reconnaissables issus de caractères distinctifs dont la combinaison permet de les identifier et de les différencier. Falconer (2003, p. 15-16) rappelle également qu'aucun critère absolu ne permet à lui seul de qualifier un objet de fractal : c'est la présence d'une combinaison suffisante de propriétés caractéristiques, même si certaines sont absentes, qui justifie cette classification. Enfin, Eglash (1999, p. 15-19) précise que la géométrie fractale repose sur quatre attributs fondamentaux formant sa base conceptuelle, illustrés par des exemples classiques tels que la courbe de Koch.

2.1. Irrégularité géométrique

Batty et Longley (1994, p. 4) décrivent l'irrégularité géométrique comme une propriété fondamentale des fractales : loin de la régularité des formes euclidiennes, elles présentent des structures discontinues et fragmentées, conformément à la définition proposée par Mandelbrot. Cette discontinuité génère des formes complexes, présentes aussi bien dans les paysages naturels que dans l'organisation des espaces urbains. Gleick (2011, p. 97) exprime clairement cette opposition : « *Là où les formes euclidiennes étaient régulières et lisses, les formes fractales étaient irrégulières et fragmentées. Là où les formes euclidiennes relevaient du domaine de l'idéal, les formes fractales saisissaient la rugosité du réel.* » Loin d'être des anomalies, elles reproduisent fidèlement la complexité et la fragmentation observables dans la nature. Falconer (2003, pp. 18-25) confirme que les fractales sont trop irrégulières, localement comme globalement, pour admettre des tangentes ou être décrites par les outils classiques de la géométrie euclidienne. Des exemples tels que l'ensemble de Cantor, la courbe de von Koch ou l'ensemble de Julia (voir figure 6.4) illustrent cette absence de régularité et la nécessité d'approches mathématiques spécifiques pour les décrire.

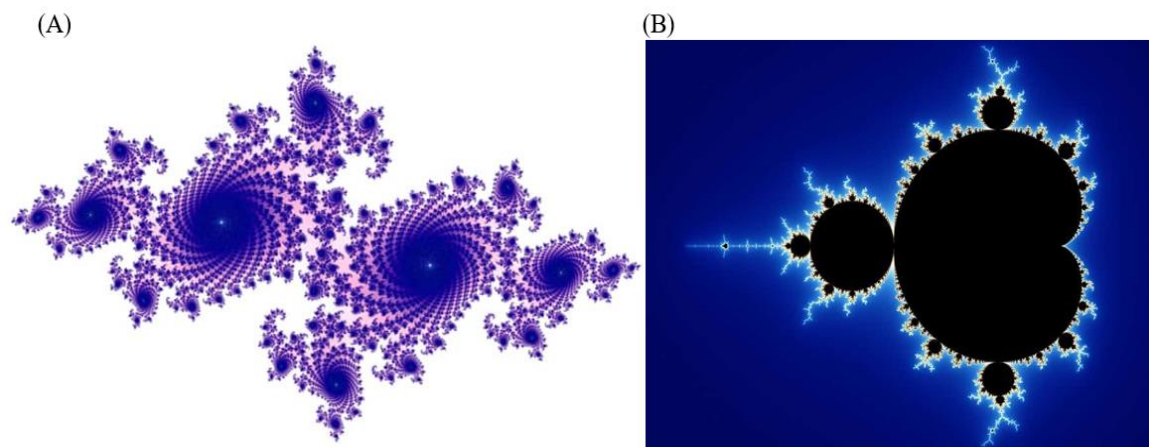


Figure 6.4. Fractales irrégulières vulgarisées par Mandelbrot : (A) Ensemble de Julia ; (B) Fractale de Mandelbrot. Source : <https://www.futura-sciences.com/sciences/photos/photos-beaute-art-fractal-645/photos-ensembles-julia-fractales-somptueuses-3609/>, consulté en Décembre 2024.

2.2. Itération et processus génératif

Dauphiné (2011, p.3-4) définit l'itération comme le procédé fondamental par lequel une fractale est générée : il s'agit de répéter à l'identique une règle de transformation géométrique sur une figure initiale, un nombre indéfini de fois ou jusqu'à une précision choisie. Ce processus, produit à chaque étape une figure plus complexe tout en conservant une structure similaire à celle de départ. Dans une approche formalisée, Frankhauser (1994, p.43-61) confirme qu'une fractale est construite par itérations successives à partir d'une forme initiale appelée initiateur, sur laquelle on applique une règle géométrique de remplacement (générateur). Chaque itération produit un motif selon un processus autosimilaire : le motif est répété un certain nombre de fois et réduit proportionnellement. Ainsi les paramètres fondamentaux sont :

- N : nombre de copies obtenues après chaque itération.

- R : facteur de réduction.
- L_0 : longueur ou mesure initiale.
- Initiateur : forme de départ (segment, carré, triangle, etc.).
- Nombre d'éléments à l'itération k : $N_k = N^k$ (6.1)
- Taille des éléments à l'itération k : $l_k = \frac{L_0}{R^k}$ (6.2)
- Formule générale de la dimension fractale $D = \frac{\log(N)}{\log(R)}$ (6.3)

Sur trois exemples des fractales, Courbe de Koch, Ensemble de Cantor, et Tapis de Sierpinski, l'itération et le processus génératif des fractales peuvent être illustrés comme suivant :

- Courbe de Koch

Initiateur : segment de longueur L_0

Générateur : chaque segment est remplacé par 4 segments égaux de longueur $\frac{L_0}{3}$

Paramètres : $N = 4$, $R = 3$

Longueur à l'itération k : $L_k = L_0 \left(\frac{4}{3}\right)^k$ (6.4)

- Dimension fractale : $D = \frac{\log(4)}{\log(3)} \approx 1.2619$ (6.5)

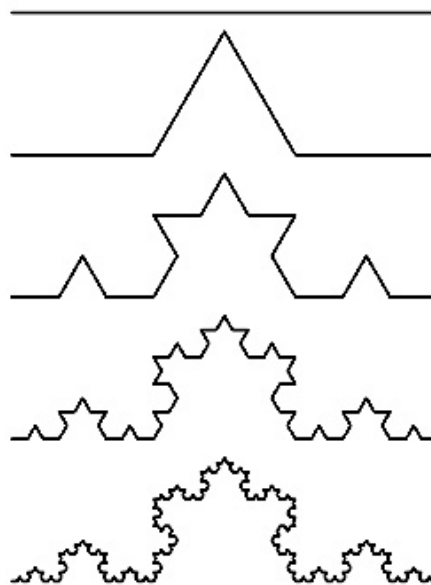


Figure 6.5. Itération et génération de la courbe de Koch. Source : Frankhauser (1994).

- Ensemble de Cantor

Initiateur : segment de longueur L_0

Générateur : retirer le tiers central

Paramètres : $N = 2$, $R = 3$

Longueur à l'itération k : $L_k = L_0 \left(\frac{2}{3}\right)^k$ (6.6)

Dimension fractale : $D = \frac{\log(2)}{\log(3)} \approx 0.6309$ (6.7)

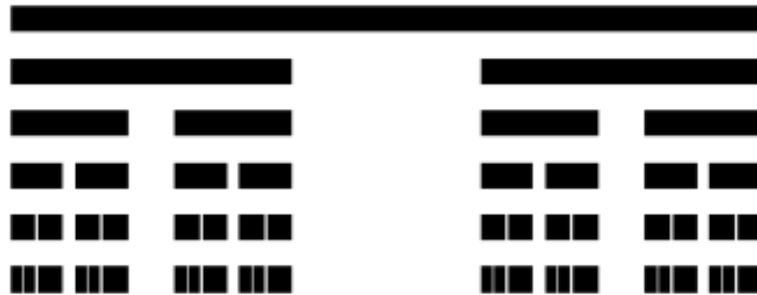


Figure 6.6. Itération et génération de l'ensemble de Cantor. Source : Frankhauser (1994).

- Tapis de Sierpinski

Initiateur : carré plein de côté L_0

Générateur : diviser le carré en 9 sous-carrés égaux et retirer le central

Paramètres : $N = 8$, $R = 3$

Surface à l'itération k : $A_k = A_0 \left(\frac{8}{9}\right)^k$ (6.8)

Dimension fractale : $D = \frac{\log(8)}{\log(9)} \approx 1.8928$ (6.9)

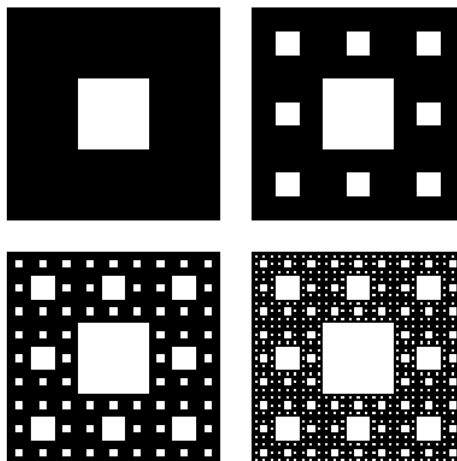


Figure 6.7. Itération et génération du tapis de Sierpinski. Source : Frankhauser (1994).

2.3. Autosimilarité

Gleick (2011, p.96) définit l'autosimilarité comme la propriété fondamentale des fractales où chaque partie de la forme ressemble au tout, et ce à différentes échelles d'observation. Il écrit : « *Mandelbrot a montré qu'un grand nombre d'objets réels : nuages, côtes, poumons, marchés financiers partagent une propriété d'autosimilarité : leurs parties ressemblent à l'ensemble* ». Ainsi, il explique que cette caractéristique se retrouve aussi bien dans des modèles mathématiques que dans des structures naturelles. En observant un fragment d'un objet autosimilaire, on retrouve le même motif général que dans l'ensemble complet, ce qui crée une continuité de forme et de structure à travers les niveaux d'échelle. Cette répétition n'est pas toujours parfaite dans la nature : on parle alors d'autosimilarité approximative, où la ressemblance reste reconnaissable même si les détails diffèrent.

Avec plus d'attention sur la ville, Batty et Longley (1994, p.4-8) définissent l'autosimilarité comme la propriété selon laquelle une forme présente les mêmes motifs ou structures à différentes échelles d'observation, autrement dit qu'elle conserve la même apparence globale lorsqu'on effectue un zoom avant ou arrière. Tout en confirmant que l'autosimilarité est inséparable à l'invariance d'échelle, ils précisent toutefois que, dans le monde réel, et notamment pour les formes urbaines, cette propriété est rarement parfaite : « *La plupart des phénomènes naturels et urbains ne sont qu'autosimilaires de manière statistique : ils présentent un comportement de type fractal sur un intervalle limité d'échelles* ». Cela signifie que l'autosimilarité des villes est statistique : les motifs urbains se ressemblent globalement d'une échelle à l'autre, mais avec des variations et des irrégularités propres aux systèmes complexes. Ainsi, l'autosimilarité est à la fois un principe mathématique exact dans les fractales idéales et un patron « *pattern* » morphologique approximatif dans les formes naturelles et urbaines.

2.4. L'invariance d'échelle

Dauphiné (2011, p.16) définit l'invariance d'échelle comme la propriété fractale selon laquelle certaines caractéristiques géométriques ou statistiques d'un objet restent inchangées, ou suivent les mêmes lois, quel que soit le niveau d'observation. Il précise aussi que l'invariance d'échelle englobe l'autosimilarité, ce qui signifie qu'elle ne se limite pas à la répétition de motifs visuels : elle inclut aussi la persistance de relations ou de corrélations spatiales sur de grandes distances. Autrement dit, un objet invariant d'échelle conserve la même organisation globale lorsqu'on zoome ou dézoome, et ses propriétés mesurées restent constantes ou obéissent à des lois prévisibles, souvent des lois de puissance. De son côté, Gleick (2011, p.96) évoque l'invariance d'échelle est une conséquence directe de l'autosimilarité des fractales : une forme est dite invariante à l'échelle lorsque sa structure reste la même quelle que soit la taille à laquelle on l'observe. Il confirme que cette invariance est ce qui rend les fractales indépendantes d'une unité de mesure, et ce qui explique pourquoi, dans la nature, on peut observer des formes similaires dans un nuage entier et dans un petit fragment de ce nuage, ou dans la ligne côtière d'un pays et dans celle d'une baie.

Dans une vision complémentaire, Haghani (2009, p. 21) définit l'invariance d'échelle comme une propriété essentielle des fractales, selon laquelle aucune échelle particulière ne

domine la structure, les mêmes motifs ou propriétés statistiques pouvant être observés à différents niveaux d'analyse. Cette invariance implique que la structure conserve une organisation comparable, qu'on l'examine à petite ou grande échelle, et qu'il est donc possible d'étudier un espace urbain de manière hiérarchique et multi-niveaux. Il précise que cette propriété est étroitement liée à l'autosimilarité, mais qu'elle ne suppose pas nécessairement une répétition exacte des formes : il s'agit plutôt d'une cohérence structurelle qui se maintient quelle que soit la taille d'observation. Cette caractéristique rend la géométrie fractale particulièrement adaptée à l'analyse morphologique des villes, où l'organisation spatiale peut être examinée avec la même logique depuis l'échelle des parcelles et rues jusqu'à celle de l'ensemble urbain.

2.5. Dimension fractale

Batty et Longley (1994, p.6) définissent la dimension fractale comme une mesure quantitative du degré de complexité spatiale d'une forme et de la manière dont elle occupe l'espace à différentes échelles. Contrairement aux objets euclidiens, caractérisés par une dimension entière (1 pour une ligne, 2 pour une surface), les formes fractales présentent une dimension non entière qui traduit leur irrégularité et leur densité spatiale. Pour les villes, cette mesure constitue un indice synthétique de complexité permettant de comparer les formes et motifs de la structure urbaine, qu'il s'agisse de réseaux viaires ou de zones bâties. Ils insistent sur le fait que la dimension fractale rend compte de l'organisation hiérarchique et autosimilaire des structures urbaines, et qu'elle permet d'analyser la morphologie urbaine sur un large éventail d'échelles, en mettant en lumière l'émergence de formes complexes issues de processus d'auto-organisation.

Parallèlement, Frankhauser (1994, p.43-44), tout en reprenant la définition mathématique de la dimension fractale (voir formule 6.3), met l'accent sur son intérêt comme outil empirique pour analyser l'organisation hiérarchique des formes urbaines, là où la géométrie classique atteint ses limites. Il propose plusieurs méthodes de calcul adaptées au contexte urbain : quadrillage, dimension radiale, dimension de corrélation, afin de saisir les différentes expressions de la complexité spatiale. Pour lui, la dimension fractale sert à la fois d'indicateur de comparaison entre sous-systèmes urbains et d'instrument de suivi de l'évolution morphologique dans le temps. En mettant en évidence un « ordre caché » derrière l'irrégularité apparente des tissus urbains, elle établit un lien entre observation, mesure quantitative et compréhension dynamique des processus de morphogenèse.

2.6. Autres caractéristiques

En complément des éléments déjà évoqués, Eglash (1999, p. 14-17) identifie trois propriétés des fractales. La première, « *scaling* » (changement d'échelle), désigne la répétition d'un même schéma à différentes tailles, de manière à conserver une similarité de forme. La deuxième, « *recursion* » (récursivité), correspond à l'application itérative d'une règle de construction, générant progressivement des structures d'une complexité croissante. La troisième, « *infinity* » (infinité potentielle), renvoie à la possibilité théorique de prolonger indéfiniment ce processus, même si, dans les pratiques réelles ou culturelles, la répétition est limitée par des contraintes matérielles ou contextuelles. Dauphiné (2011, p. 14) complète cette

approche en soulignant que les structures fractales, notamment dans l'espace géographique, obéissent fréquemment à des lois de puissance, caractéristiques des systèmes complexes autoorganisés. Ces lois traduisent le fait que certaines régularités statistiques persistent sur plusieurs ordres.

En résumé, les fractales sont un outil puissant pour comprendre la complexité des formes naturelles et urbaines. Grâce à leurs propriétés : irrégularité géométrique, itération, autosimilarité, invariance d'échelle et dimension fractale, elles dépassent les limites de la géométrie classique et permettent de décrire des structures complexes et organisées en différentes échelles. Même si les modèles mathématiques sont souvent idéals, ces caractéristiques se manifestent partiellement dans la forme réelle des villes, façonnées par l'auto-organisation et les transformations progressives. Tout en dépassant l'analogie et la métaphore, leur usage en analyse des formes urbaines demande cependant de tenir compte des contraintes sociales, physiques et contextuelles, ainsi que du caractère approximatif des motifs observés. Associées à des outils comme la dimension fractale et les lois de puissance, elles offrent une vision multi-échelle et dynamique des formes urbaines, qui mérite d'être développée en études urbaines et en architecturales.

3. Application des fractales en études urbaines

Après avoir détaillé les caractéristiques fondamentales des fractales, il est désormais pertinent d'explorer comment ces propriétés peuvent être mobilisées pour analyser, comprendre et modéliser les formes urbaines. L'application des fractales en études urbaines ouvre en effet un champ riche et prometteur pour saisir la complexité spatiale des villes, en révélant des structures hiérarchisées, irrégulières et autoorganisées qui échappent aux approches classiques.

3.1. Les fractales, modèle et langage de la complexité urbaine

Mandelbrot (1982, p. 84-85) affirme que les fractales constituent une clé essentielle pour comprendre la complexité. Bien plus que des modèles mathématiques destinés à représenter des formes irrégulières, elles incarnent un véritable langage de la complexité, capable de décrire des structures spatiales hétérogènes, dynamiques et autoorganisées. Ce double statut, à la fois modèle formel et langage descriptif, rend les fractales particulièrement adaptées à l'analyse morphogénétique des formes urbaines. Suivant cette approche, Gleick (2011, p. 96) souligne que la géométrie fractale permet de représenter des formes naturelles que la géométrie euclidienne ne pouvait saisir. Les fractales capturent la rugosité du réel, révélant un ordre sous-jacent dans le désordre apparent grâce à l'autosimilarité, qui assure la répétition de motifs à différentes échelles. Barnsley (2014, p. 81), quant à lui, insiste sur la rigueur du formalisme fractal en le qualifiant de nouveau langage, fondé sur des règles simples et récursives. Par le biais des fonctions itérées, il démontre comment des formes complexes émergent de processus itératifs simples, incarnant la logique des systèmes complexes autoorganisés.

Bertuglia et al. (1998), dans une perspective conceptuelle défendent une approche de la ville perçue par la complexité, dépassant les lectures classiques, réductionnistes et

déterministes. Ils affirment que les villes doivent être considérées comme des systèmes complexes adaptatifs. Ainsi, ils introduisent la géométrie fractale comme alternative à la géométrie euclidienne pour représenter les formes urbaines complexes, irrégulières et hiérarchisées. Les fractales sont à la fois outil d'analyse et métaphore de la complexité. Poursuivant cette orientation, mais dans une perspective plus opérationnelle, Pumain (1998) développe une approche systémique fondée sur la modélisation. En s'appuyant sur des concepts clés tels que l'émergence, l'auto-organisation, et la multi-échelle, elle cherche à comprendre comment des interactions locales peuvent générer des structures urbaines globales. Les fractales, intégrées aux côtés d'outils tels que les automates cellulaires et les systèmes multi-agents, permettent de modéliser la diversité des morphologies urbaines à différentes échelles. De son côté, Dauphiné (2011, p. 2-14) établit un lien fondamental entre fractales et complexité, en montrant que la géographie et les études urbaines trouvent dans le paradigme fractal un cadre théorique et méthodologique pertinent. Il affirme que ce paradigme agit comme une charnière, ou un pont, permettant une analyse conjointe des formes irrégulières et de leur organisation hiérarchique. Les propriétés fractales, telles que l'autosimilarité et l'invariance d'échelle, permettent en effet de modéliser la complexité morphologique des territoires, tandis que la dimension fractale rend compte de leur rugosité. Ces formes, selon lui, sont le produit de dynamiques non linéaires et de régulations internes caractéristiques des systèmes complexes.

Conjointement, Salingaros (2005) aborde les fractales à la fois comme modèle explicatif et comme langage formel de la complexité urbaine. Il soutient que les villes traditionnelles, construites de manière incrémentale et adaptative, possèdent une structure intrinsèquement fractale : elles se caractérisent par une hiérarchie d'échelles interconnectées, une autosimilarité partielle, et une connectivité dense entre les éléments bâtis. La fractalité constitue ainsi, selon Salingaros, un modèle puissant pour comprendre la morphogenèse des formes urbaines complexes, mais aussi un langage géométrique, cognitif et opérationnel permettant d'évaluer la qualité d'un tissu urbain et de guider sa conception. Toutefois, si ce paradigme offre un cadre fertile pour l'analyse de la complexité urbaine, il convient d'en reconnaître les limites : toute forme urbaine complexe n'est pas nécessairement fractale, et le risque d'une lecture trop formaliste ou rétroactive n'est pas à écarter. Dans une vision anthropologique et culturelle, Eglash (1999, p. 8-19) souligne que la géométrie fractale offre une alternative aux modèles linéaires et euclidiens pour comprendre des systèmes autoorganisés. Il affirme que les motifs fractals représentent une forme de complexité générée par des règles simples appliquées récursivement, ce qui produit des formes riches et structurées à toutes les échelles. Aussi, il insiste sur le fait que cette complexité émerge non pas du hasard, mais de systèmes structurés culturellement, ce qui est particulièrement vrai dans les motifs des architectures africaines. De ce fait, cette complexité culturelle, incarnée par les fractales africaines, ne peut être réduite à une esthétique naïve ou primitive : elle relève plutôt de logiques cognitives, sociales et symboliques profondes, et constitue un savoir indigène complexe, à part entière.

3.2. Fractales et morphogenèse urbaine

Les fractales constituent bien plus qu'un outil mathématique : elles sont un véritable langage de la complexité, capable de saisir la structure hiérarchique, l'hétérogénéité et l'auto-organisation propres aux systèmes urbains. Cette capacité à représenter l'ordre caché dans les formes irrégulières, à articuler des échelles imbriquées et à modéliser des dynamiques, en fait un instrument capable de comprendre comment les formes urbaines émergent et se transforment. Basili (1998) prolonge cette idée en présentant les fractales comme une grammaire de la morphogenèse urbaine. Partant d'une critique des approches modernistes, fondées sur une logique top-down et une géométrie statique, elle propose de concevoir l'espace urbain comme un système complexe, animé par des forces d'auto-organisation, de mémoire spatiale et d'évolution dynamique. Le principe de résistance minimale (selon lequel les flux et les fonctions tendent à se répartir le long des chemins nécessitant le moins d'effort) est identifié comme l'un des moteurs de cette morphogenèse. De cette façon, les fractales deviennent non seulement un outil d'analyse et de lecture des formes urbaines, mais aussi un instrument de simulation et de conception. De son côté, pour Dauphiné (2011, p.54-55) la morphogenèse urbaine est un processus itératif et multi-échelles où des règles locales simples produisent, par répétition, des formes globales complexes. Les villes présentent ainsi des structures fractales, avec des hiérarchies spatiales et des irrégularités mesurables. Ces formes, issues de régulations internes dans des systèmes instables, obéissent souvent à des lois de puissance caractéristiques des systèmes autoorganisés, faisant de la fractalité la signature géométrique de la formation urbaine.

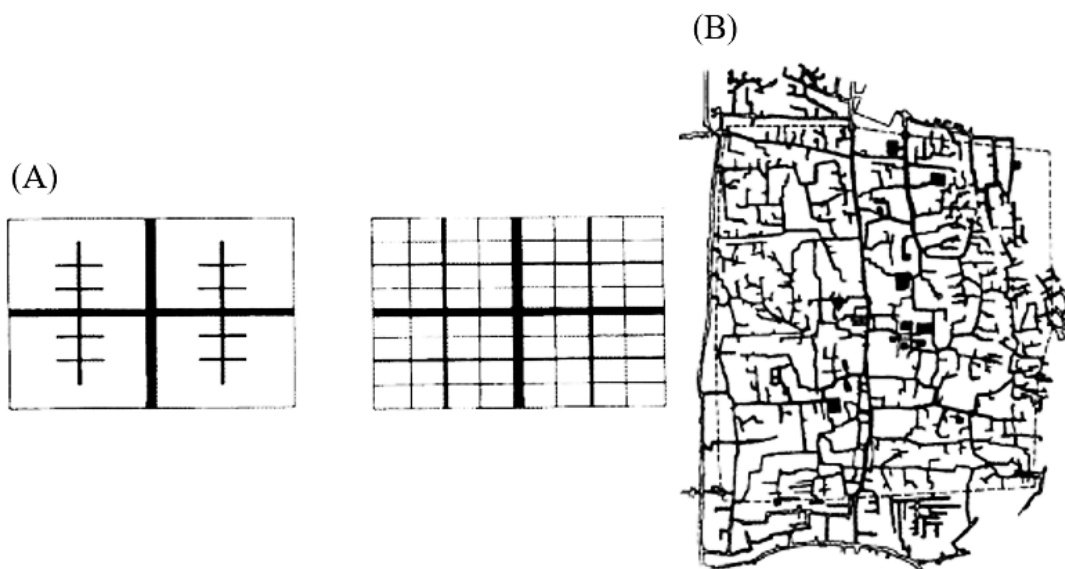


Figure 6.8. Morphogenèse du tissu urbain traditionnel suivant la logique fractale : (A) Itération du réseau viaire ; (B) Fragment du Caire historique. Source : Basili (1998).

Oliveira (2016, p. 87-149) mentionne les fractales parmi les outils d'analyse spatiale mobilisés en morphologie urbaine, soulignant leur capacité à caractériser la complexité formelle des tissus bâtis. Il insiste sur leurs propriétés d'autosimilarité et d'invariance d'échelle, qui permettent de mesurer l'irrégularité et de repérer les structures hiérarchiques répétitives, caractéristiques des formes urbaines. Si son propos reste surtout descriptif, ces

propriétés trouvent un prolongement analytique dans les travaux de Batty et Longley (1994, p. 12-36), qui établissent un lien direct entre morphogenèse urbaine et géométrie fractale. Selon eux, les villes se développent par des processus dynamiques et autoorganisés que la géométrie fractale modélise particulièrement bien. Ils montrent que la structure hiérarchique et autosimilaire des formes urbaines, observée à différentes échelles, constitue une signature de leur morphogenèse. À travers des modèles de croissance urbaine, ils simulent la formation de structures complexes à partir de règles locales simples, capables de reproduire l'irrégularité organisée des villes réelles. Dans cette perspective, la géométrie fractale ne sert pas seulement à décrire la forme aboutie, mais aussi à représenter le processus de génération urbaine, ce qui en fait un outil essentiel pour comprendre la morphogenèse dans les systèmes complexes.

Parallèlement, Salingeros (2005) établit un lien fondamental entre fractalité et morphogenèse urbaine, concevant la ville comme un système complexe vivant. Pour lui, la structure fractale des villes traditionnelles n'est ni un choix esthétique ni une simple construction géométrique, mais l'aboutissement d'un processus morphogénétique reposant sur des interactions locales, des ajustements progressifs, une croissance par différenciation et une hiérarchie d'échelles interconnectées, des caractéristiques propres aux systèmes autoorganisés. Dans cette optique, les fractales ne décrivent pas seulement la forme finale d'un tissu urbain : elles constituent simultanément un langage et un modèle du processus qui l'a engendré. Il définit la fractale comme structure hiérarchique et une organisation où les petites unités sont très nombreuses par rapport aux grandes. Dans la ville traditionnelle, ce schéma résulte de processus morphogénétiques adaptatifs, générant richesse visuelle, complexité perceptive et cohérence fonctionnelle par l'intégration harmonieuse de toutes les échelles. Cette vision qualitative trouve un prolongement dans des approches quantitatives issues d'autres travaux, où la hiérarchie d'échelles des villes beaucoup plus de petites entités (rues locales, parcelles modestes, quartiers réduits) que de grandes est interprétée comme la signature d'un processus itératif analogue à celui d'une fractale. Le « *ht-index* » (Jiang et Ying, 2014) permet de mesurer le nombre de niveaux hiérarchiques et donc le degré de complexité atteint, tandis que le « *fht-index* » (Jiang et Ma, 2018) affine cette mesure de façon continue, offrant un suivi plus précis des phases intermédiaires de croissance et de transformation des formes urbaines.

Dans une perspective quantitative, Frankhauser (1998) montre que la formation des formes urbaines, bien qu'issue de décisions individuelles, localisées et souvent aléatoires, tend, avec le temps, à produire des structures globales organisées, hiérarchisées et complexes, caractéristiques des fractales. Il décrit la croissance urbaine comme un processus itératif et spatialement structuré, comparable à la génération de certaines fractales mathématiques tel le tapis de Sierpinski où se répètent, à différentes échelles, des motifs d'agrégation, de vides et de hiérarchies multiscalaire. L'analyse de l'évolution temporelle de plusieurs villes l'amène à constater que la morphogenèse urbaine conduit fréquemment à une organisation centrée autour d'un noyau dominant. Cette organisation peut être mesurée à l'aide d'indicateurs fractals tels que la dimension fractale ou la détection de ruptures spatiales. Dès 1994 (p. 40-42), Frankhauser avait déjà établi que cette structure fractale constitue l'expression directe de la morphogenèse urbaine : un enchaînement de processus locaux, incrémentaux et adaptatifs,

façonnant l'espace à partir d'interactions de proximité et de contraintes multiples géographiques, économiques et sociales. Il insiste toutefois sur la nécessité de dépasser les simples analogies visuelles entre fractales mathématiques et formes urbaines, analogies souvent trompeuses. Pour lui, seule une analyse rigoureuse, reposant sur des mesures objectives (dimension, hiérarchisation, distribution), permet de valider l'existence de propriétés fractales dans les formes urbaines. Comme il le souligne : « ... *Ces ressemblances superficielles ne suffisent ni à prouver que les villes suivent, à différentes échelles, effectivement des lois fractales, ni à trouver une interprétation pour de tels résultats. Ainsi, quelques notions fondamentales sur les fractales, indispensables pour une telle discussion, doivent être présentées d'abord.* »

Enfin, Eglash (1999, p. 20–38), dans son analyse culturelle et anthropologique, montre que la structure spatiale de nombreux villages et villes africains adopte une organisation fractale : cercles de cases inscrits dans des cercles plus grands, enceintes rectangulaires emboîtées, rues principales se ramifiant en voies secondaires puis en sentiers, reproduisant à chaque échelle un motif similaire. Ce schéma d'autosimilarité spatiale traduit un processus proche de la morphogenèse : la forme urbaine émerge par itération de règles simples, division de l'espace, recentrage autour de points nodaux, plutôt que par un plan figé. Eglash précise que cette géométrie répétitive n'est pas fortuite : elle résulte souvent d'intentions explicites des bâtisseurs, qui conçoivent l'espace selon des principes culturels récurrents. Ce mode de croissance engendre des tissus autoorganisés, où la complexité formelle se développe progressivement, rejoignant les logiques de morphogenèse urbaine explorées aujourd'hui par les sciences de la complexité et l'urbanisme génératif. L'auteur rapproche ainsi ses observations ethnographiques des modèles fractals utilisés pour simuler la croissance urbaine.

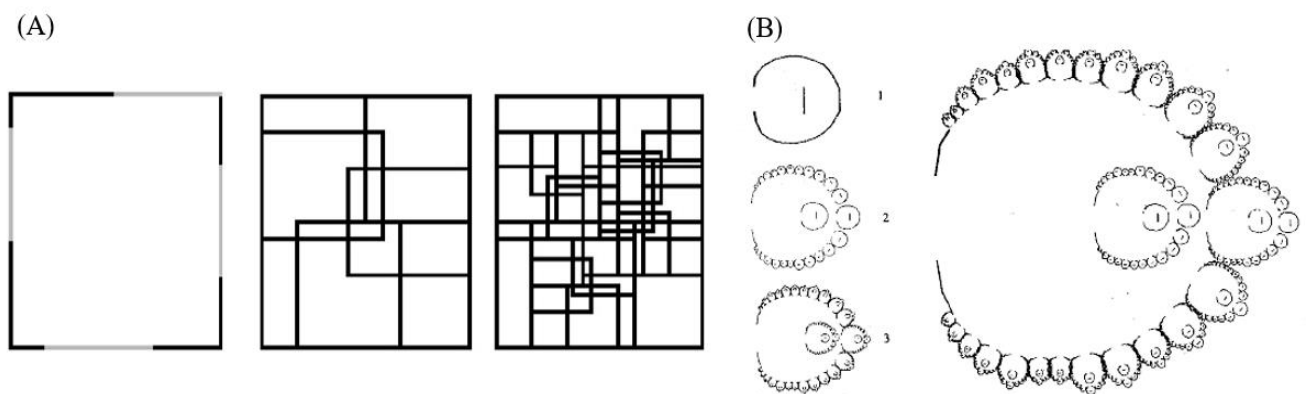


Figure 6.9. Genèse des formes urbaines africaines selon les itérations fractales : (A) Forme rectangulaire ; (B) Forme circulaire. Source : Eglash (1999).

3.3. Exemples de différentes applications

Ainsi, la géométrie fractale, envisagée comme langage et modèle de la complexité urbaine, permet non seulement de décrire les formes existantes mais aussi de comprendre et de simuler les processus qui les génèrent. Cette double capacité ouvre la voie à de nombreuses applications pratiques en analyse morphologique, planification et modélisation urbaine, que nous illustrons dans ce qui suit.

3.3.1 La géométrie fractale dans la morphologie urbaine

Depuis les années 1990, plusieurs travaux ont démontré que les structures urbaines peuvent être décrites à l'aide des principes de la géométrie fractale. Les recherches pionnières de Batty et Longley (1994), et de Frankhauser (1994) ont montré que la croissance et l'organisation spatiale des villes obéissent à des logiques hiérarchiques et autosimilaires. Des études plus récentes (Terzi et Kaya, 2011 ; Tucek, et Janoska, 2013 ; Chen, 2020 ; Man et Chen, 2020) ont confirmé que les réseaux viaires, les répartitions des usages du sol et la diversité des morphologies bâties présentent des caractéristiques fractales mesurables. Trois propriétés majeures ressortent : la hiérarchie (organisation en niveaux imbriqués, comme les rues principales, secondaires et tertiaires), l'autosimilarité (répétition de motifs à différentes échelles, par exemple dans les schémas d'occupation du sol) et l'hétérogénéité (variation dans la taille et la forme des éléments bâtis). La dimension fractale constitue l'indicateur quantitatif permettant de résumer l'ensemble de ces propriétés. Elle exprime le degré de remplissage de l'espace et la complexité des formes urbaines.

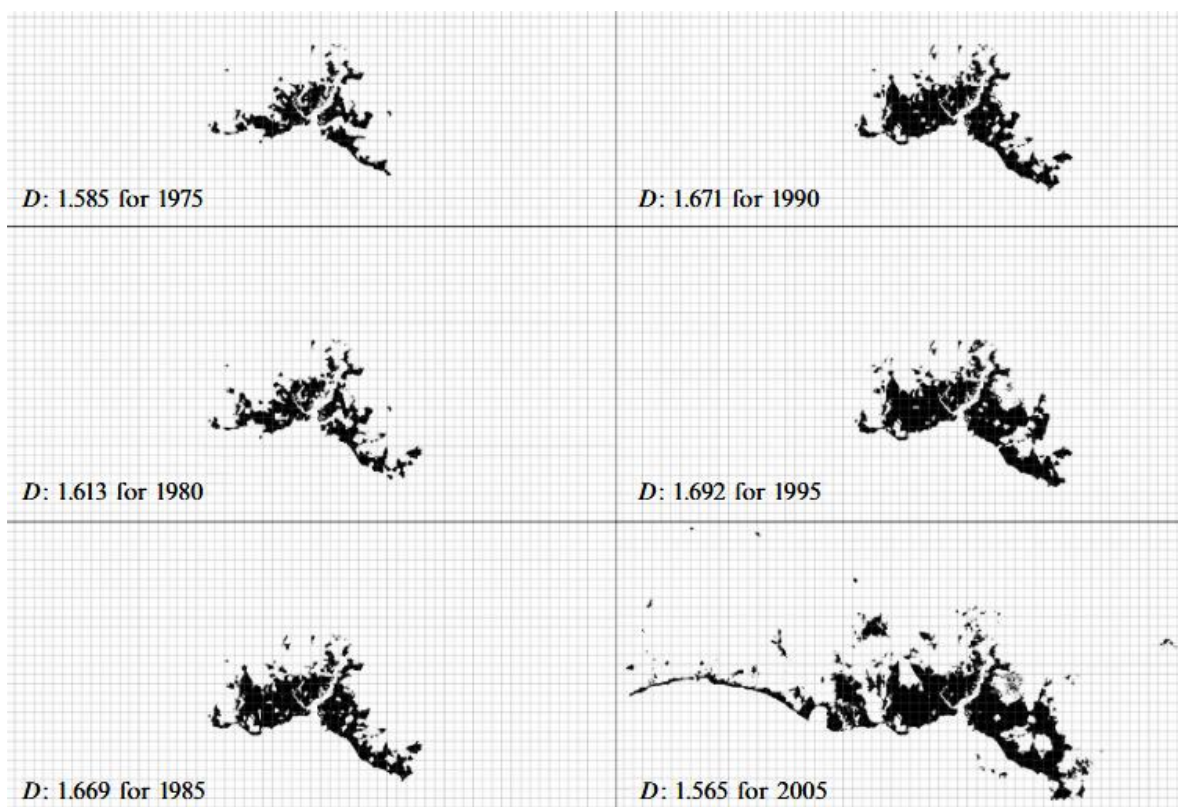


Figure 6.10. Morphogenèse et calcul de la dimension fractale d'Istanbul par le comptage de boîtes. Source : Terzi et Kaya (2011).

L'application de la dimension fractale à la morphologie urbaine ne se limite pas à une description géométrique statique, elle permet aussi d'étudier l'évolution des formes dans le temps. Batty et Longley (1994), et de Frankhauser (1994) ont montré qu'en mesurant la variation de la dimension fractale sur plusieurs décennies, on peut détecter et quantifier des phénomènes de densification, d'étalement ou de restructuration. Ultérieurement, Mcadams (2007) et Feng et Chen (2010), ont mis en évidence que les variations de cette dimension sont

liées à des processus naturels (topographie, hydrographie), climatiques, mais aussi à des dynamiques sociales, économiques et technologiques. Ainsi, la dimension fractale ne se contente pas de fournir une description de l'état urbain, mais elle retrace également son histoire morphologique, en renseignant sur les rythmes et les modes de croissance (Chen, 2018). La méthode la plus utilisée pour déterminer la dimension fractale des villes est celle du comptage de boîtes « *box-counting* », qui consiste à recouvrir la structure étudiée d'une grille de mailles de différentes tailles et à compter le nombre de mailles occupées par l'objet à chaque échelle. Cette technique est particulièrement efficace pour étudier les réseaux de rues et la forme globale du bâti.

Parallèlement, pour qu'une structure urbaine puisse être considérée comme fractale, elle doit présenter deux caractéristiques fondamentales :

- Une loi de puissance : il existe une relation mathématique de type $y = k * x^\alpha$ (x sont les variables mesurées, k est une constante de proportionnalité, et α est l'exposant de la loi, qui détermine la pente sur une échelle logarithmique), où la variation d'une grandeur (par exemple la fréquence des rues d'une certaine longueur) est proportionnelle à une puissance d'une autre grandeur (Kim et al., 2007).
- Une distribution invariante d'échelle : la structure conserve des propriétés similaires à toutes les échelles d'observation. Autrement dit, que l'on observe un quartier, une rue ou un bâtiment, on retrouve des motifs et des proportions analogues (Lu et al., 2016).

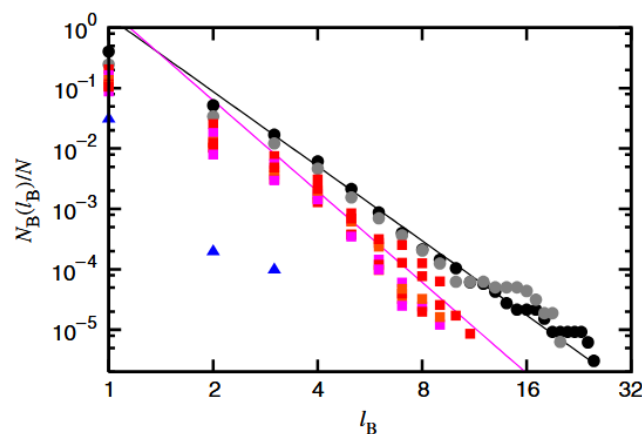


Figure 6.11. Distribution invariante d'échelle en loi de puissance du réseau viaire à Séoul. Source : Kim et al. (2007)

Cette invariance d'échelle, est une caractéristique qui distingue les villes des objets géométriques classiques. Les mesures habituelles (longueur, surface, volume) reposent sur des formes euclidiennes régulières et ne peuvent donc pas décrire fidèlement la complexité urbaine. Cependant, dans la réalité les villes ne sont pas des fractales idéales. Les formes urbaines présentent souvent des propriétés fractales sur une plage d'échelles limitée, ce qui les classe dans la catégorie des pré-fractales (Chen, 2020). Par exemple, un motif urbain peut être autosimilaire de l'échelle du bâtiment à celle du quartier, mais perdre cette autosimilarité à

l'échelle de l'agglomération entière. Cette limitation est importante à considérer, car elle influe sur la manière dont on interprète la dimension fractale mesurée.

3.3.2. Les fractales dans les réseaux viaires

De nombreuses études ont confirmé que les réseaux viaires urbains présentent des propriétés fractales, tant sur le plan géométrique que structurel (Benguigui, 1992 ; Rodin et Rodina, 2000 ; Lu et Tang, 2004 ; Sun et al., 2007 ; Mo et al., 2015 ; Zhang et al., 2021). Dès ses premiers travaux appliqués au réseaux ferroviaires, Benguigui (1992, 1995) a mis en évidence que ces réseaux suivent un modèle d'organisation fractal commun, caractérisé par une hiérarchie et une complexité spatiale spécifique. Par la suite, cette approche a été étendue aux différents réseaux urbains notamment les réseaux viaires, où la fractalité offre un cadre pertinent pour analyser la structure et la dynamique des voies.

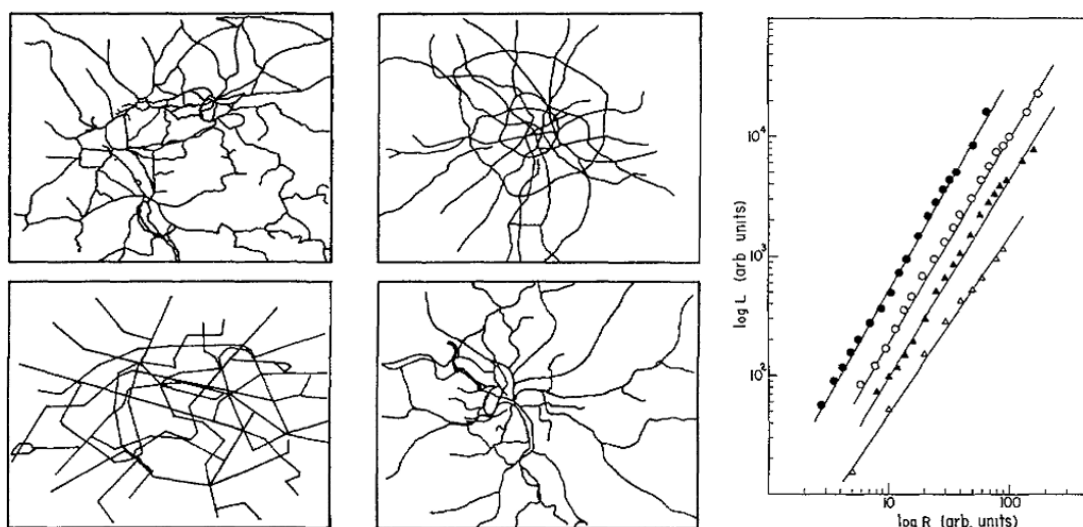


Figure 6.12. Réseau ferroviaire suivant une organisation fractale. Source : Benguigui (1992)

Plusieurs recherches montrent que la dimension fractale du réseau viaire dépend de la densité de rues et de l'étendue spatiale du réseau (Rodin et Rodina, 2000 ; Lu et al., 2016). Kim et al. (2003) ont montré que l'ajout de nouvelles rues augmente la dimension fractale, traduisant un accroissement de la complexité. Lu et Tang (2004) ont observé que la taille croissante d'une ville s'accompagne d'un réseau viaire de plus en plus complexe, caractérisé par des densités variables selon les zones urbaines, ce qui se traduit par des dimensions fractales différenciées. Il est important de souligner que la dimension fractale ne se réduit pas à la densité simple des rues. Sun et al. (2007) précisent que, contrairement à la densité qui varie selon l'échelle d'observation, la dimension fractale peut rester stable sur différentes échelles, ce qui en fait un indicateur plus robuste de la complexité spatiale. Xu et al. (2010) soulignent en outre que la dimension fractale permet d'évaluer plusieurs caractéristiques essentielles du réseau viaire : la densité, la structure topologique, la connectivité et la fonction des rues dans le système. On distingue deux dimensions fractales pour décrire les réseaux viaires :

- La dimension fractale géométrique (D_g), qui renseigne sur la distribution spatiale des rues et sur leur capacité à couvrir uniformément l'espace urbain. Une D_g élevée traduit une meilleure accessibilité, notamment vers les zones périphériques, mais peut aussi favoriser un étalement urbain à faible densité (Lu et al., 2016).
- La dimension fractale structurelle (D_s), qui caractérise la connectivité et la hiérarchie des routes. Une D_s élevée reflète un phénomène dit de « petit monde », où les rues locales sont efficacement reliées à des artères principales, optimisant la circulation et la desserte (Lu et al., 2016 ; Zhang et al., 2021).

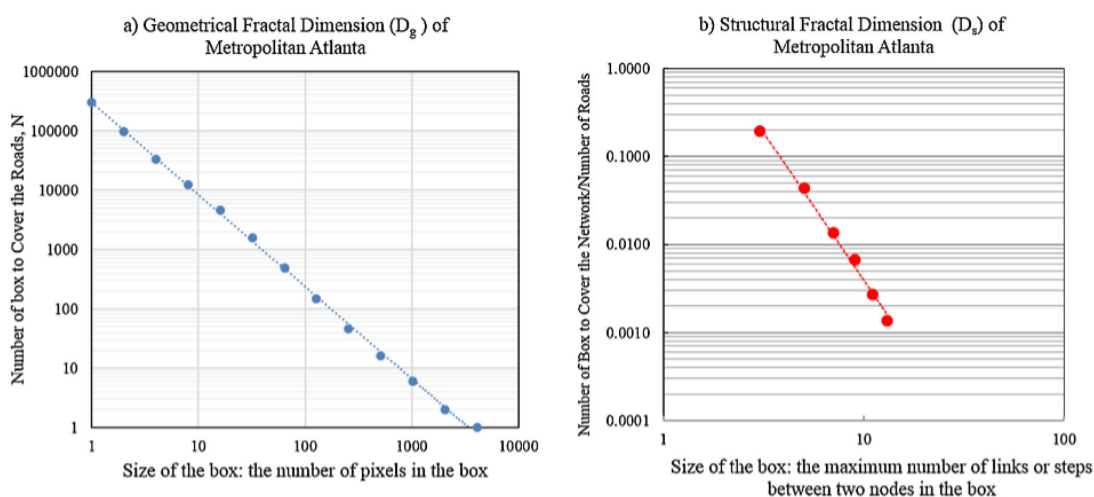


Figure 6.13. Dimension fractale géométrique et dimension fractale structurelle de la métropole d'Atlanta. Source : Lu et al. (2016).

Ces dimensions fractales se traduisent par des conséquences pratiques sur la vie urbaine. Par exemple, Lu et al. (2016) montrent qu'une forte D_g et D_s s'accompagne souvent d'émissions de carbone par habitant plus élevées, liées à la mobilité, ainsi que d'une qualité de vie potentiellement diminuée. Cette corrélation est confirmée par Ma et al. (2020), qui trouvent une relation négative entre certains indices fractals et les émissions de CO_2 , suggérant que la fractalité du réseau viaire influe directement sur les impacts environnementaux. D'autres études (De Keersmaecker et al., 2003 ; Thomas et al., 2013) ont exploré la variabilité spatiale de la dimension fractale au sein même des villes. Elles constatent que la fractalité est plus élevée dans les quartiers centraux denses et plus faible en périphérie ou en zones suburbaines, illustrant ainsi l'hétérogénéité morphologique interne au réseau. Cette variation peut aider à orienter la planification en ciblant les zones où la fractalité (et donc la complexité du réseau) est insuffisante. Par ailleurs, Wang et al. (2017) proposent d'utiliser différentes dimensions fractales pour comparer le réseau viaire avec les réseaux de transport en commun, mettant en lumière des relations linéaires entre ces dimensions qui pourraient guider les interventions pour améliorer la performance globale du système. Cependant, cette approche fractale n'est pas sans limites. La mesure de la dimension fractale dépend fortement de la résolution des données, de la méthode choisie et des échelles d'observation, ce qui peut biaiser les résultats. De plus, la fractalité n'est pas universelle : certains réseaux, notamment dans des villes fortement planifiées peuvent déroger à ces

caractéristiques, ce qui limite la généralisation du modèle fractal (Pumain, 2017). De plus, la plupart des études se concentrent sur les dimensions géométriques et topologiques du réseau, en négligeant souvent les dimensions sociales, politiques et économiques qui jouent un rôle fondamental dans la création et l'évolution des réseaux viaires.

L'application des fractales ne se limite pas à la morphologie urbaine et aux réseaux viaires, mais s'étend à de nombreux autres domaines. Puisque la présente thèse se concentre sur ces deux aspects, nous en avons détaillé plus particulièrement les usages. Cependant, les champs d'application sont bien plus vastes. Ainsi, dans l'étude de l'étalement urbain, Terzi et Kaya (2008) et Chen (2012) montrent que la dimension fractale permet de détecter et de mesurer le degré de compacité ou de dispersion spatiale : une valeur plus faible de cette dimension indiquant un étalement plus marqué. En matière de gestion de l'espace et d'analyse des frontières urbaines, Jevrić et Romanovich (2016) soulignent l'intérêt de la géométrie fractale pour caractériser la complexité des limites urbaines et leur évolution, offrant ainsi un outil d'aide à la décision pour un aménagement plus cohérent. Enfin, dans l'analyse des motifs urbains, Tannier et al. (2012) et Nie et al. (2015) montrent que la répétition des motifs à différentes échelles, mesurée par la dimension fractale, constitue un outil pertinent pour comprendre l'organisation hiérarchique de la ville et concevoir des formes urbaines conciliant densité et diversité spatiale.

L'étude des fractales en contexte urbain met en lumière leur double rôle : à la fois modèle analytique et langage de la complexité. Elles permettent de décrire la structure hiérarchique, l'auto-organisation et l'hétérogénéité des formes urbaines, réseaux viaires, et de comprendre les processus morphogénétiques qui les génèrent. La dimension fractale, l'autosimilarité et l'invariance d'échelle constituent des outils quantitatifs précieux pour mesurer la complexité urbaine et suivre son évolution dans le temps et l'espace. Les fractales offrent ainsi un cadre conceptuel et méthodologique capable de dépasser les limites de la géométrie euclidienne et des approches classiques d'analyse. Cependant, leur application nécessite une lecture critique : toutes les formes urbaines ne sont pas strictement fractales, les mesures dépendent des méthodes et des échelles, et le contexte social, économique ou politique peut moduler fortement les structures observées. Finalement, la géométrie fractale constitue un outil puissant pour comprendre et modéliser la morphogenèse urbaine, offrant des perspectives tant descriptives qu'empiriques pour l'analyse des villes. Elle permet de relier la forme urbaine aux processus sous-jacents qui la produisent.

4. Application des fractales en architecture

La géométrie fractale, qui s'est montrée utile pour analyser les formes urbaines, peut aussi être appliquée à l'architecture. Elle permet de dépasser les méthodes classiques basées sur les formes euclidiennes en introduisant les notions d'autosimilarité, de hiérarchie d'échelles et de complexité des formes. Ces principes peuvent servir à reproduire la richesse des architectures traditionnelles, à créer des structures nouvelles grâce à des procédés itératifs, ou à améliorer certains aspects fonctionnels et environnementaux. La fractalité devient ainsi un véritable langage de conception. L'architecture n'est plus seulement un objet d'étude fractale, mais un terrain d'expérimentation où ce modèle permet de combiner esthétique, fonctionnalité et

complexité. Dans la suite, nous nous intéressons à l'application des fractales à l'échelle architecturale.

En effet, l'application de la théorie de la complexité à l'architecture et au design est essentiellement interdisciplinaire (Wilson, 2000). Ses fondements s'enracinent à la fois dans les mathématiques, les sciences physiques et sociales, qui abordent des échelles variées, allant du contexte global aux éléments architecturaux élémentaires. (Turner et Baker, 2019). Au cours des dernières années, chaque domaine a exploré la complexité selon son propre point de vue, produisant des connaissances importantes qui se complètent et enrichissent la compréhension de la ville et de ses composants. Cependant, l'intégration de ces approches dans une théorie globale reste difficile. Comme le confirme Wilson (2000), différentes perspectives ont évolué indépendamment, sans être contraintes de s'assembler pour former un cadre théorique unique. Cette diversité explique en partie pourquoi des modèles tels que les fractales, issus de la théorie de la complexité, se sont révélés particulièrement utiles pour établir des liens entre disciplines et guider l'analyse et la conception architecturale.

Haghani (2009, p. 75) rappelle qu' il n'existe pas de définition universellement acceptée ou exacte de l'architecture fractale, le terme désigne plutôt un ensemble varié d'approches et de formes présentant des propriétés de type fractal. Dans la même ligne, Ostwald (2009, p.126-130) définit l'architecture fractale comme un concept complexe et évasif, dont la signification varie selon les contextes disciplinaires. Il insiste sur le fait que ce terme est utilisé différemment en architecture, en mathématiques et en sciences de la complexité, et que les définitions proposées par les architectes diffèrent souvent de celles des mathématiciens. En explorant comment ces définitions ont évolué au fil du temps et comment elles ont été influencées par les interactions entre ces disciplines. Il est important de noter que, selon Ostwald, l'architecture fractale n'est pas simplement une application directe de la géométrie fractale à la conception architecturale. Au contraire, elle représente un processus complexe de transposition et d'adaptation des idées issues des sciences de la complexité vers le domaine de l'architecture. Ce processus implique une interaction dynamique entre les concepts mathématiques et les pratiques architecturales, aboutissant à une compréhension enrichie et parfois hybride de ce que pourrait être une architecture fractale.

Sur le plan empirique, Bovill (1996, p. 58-72) définit l'architecture fractale comme une conception où le bâti présente, à l'instar de la nature, une progression d'échelles allant du grand volume aux plus fins détails, chaque niveau reprenant ou évoquant des motifs similaires et créant ainsi une autosimilarité perceptible. Cette caractéristique, mesurable par la dimension fractale, traduit la richesse et la complexité visuelle. Elle permet d'éviter la monotonie en intégrant dans les façades, plans et volumes, des rythmes et variations comparables à ceux des structures naturelles, produisant un environnement harmonieux avec son contexte et stimulant la perception à différentes distances. De son côté, Lorenz (2003, p. 6-12) décrit l'architecture fractale comme un vocabulaire capable de générer des formes détaillées à toutes les échelles, établissant un lien organique entre bâti et environnement, tant sur le plan formel que structurel. Cette logique se retrouve dans des exemples historiques et contemporains, du gothique à l'architecture organique de Gaudí ou Bruce Goff, où la répétition et la variation d'un motif d'une échelle à l'autre maintiennent l'intérêt visuel et

facilitent l'orientation. Enfin, Harris (2012, p. 4-5) définit l'architecture fractale comme l'utilisation consciente des principes d'autosimilarité, d'itération et de complexité générée par des règles simples, pour concevoir des structures reflétant les organisations et formes de la nature. Il souligne l'importance d'intégrer cette logique à toutes les échelles, de la structure globale aux détails, afin de conférer au bâtiment une cohérence multi-niveaux comparable à celle des organismes vivants.

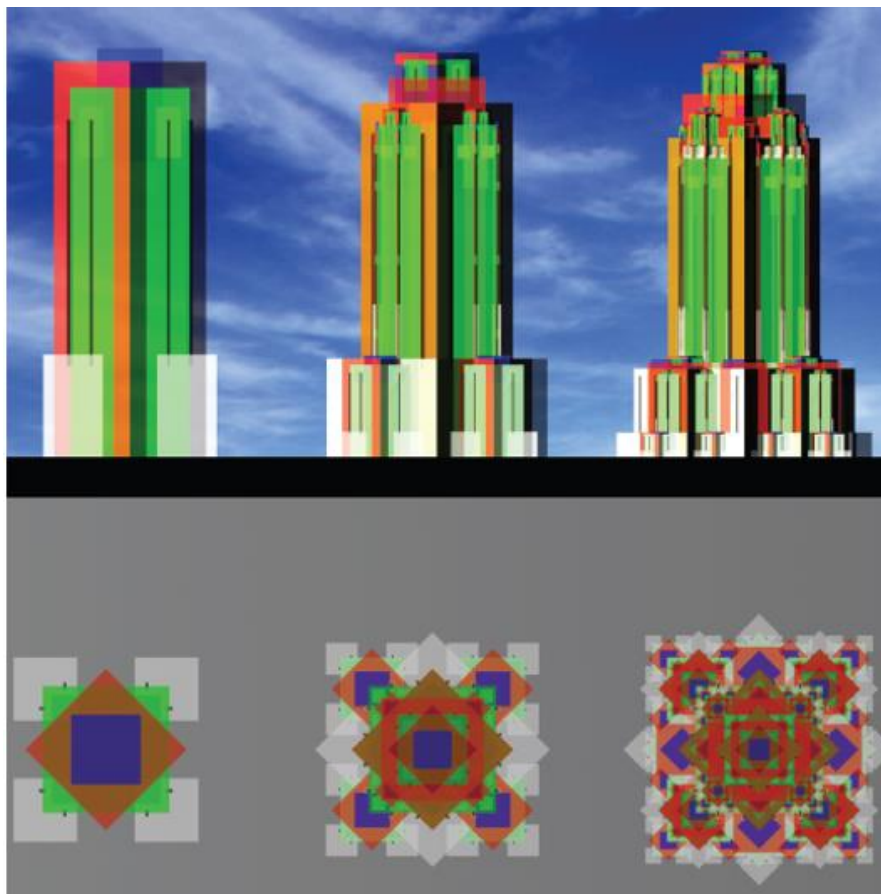


Figure 6.14. Itérations et génération d'une architecture fractale en plan et en façade. Source : Harris (2012)

Parallèlement dans une lecture historique et critique, Ostwald (2001) retrace la relation entre l'architecture et la géométrie fractale entre la fin des années 1970 et la fin des années 1990, marquée par un cycle d'enthousiasme, de rejet puis de timide réintérêt. Il confirme qu'après la formalisation des fractales par Mandelbrot, l'architecte américain Peter Eisenman inaugure leur appropriation consciente avec « *House 11a* » en 1978 (voir figure 6.15), explorant l'autosimilarité et le changement d'échelle pour remettre en cause la proportion humaine comme référence architecturale. Dans les années 1980, ces concepts sont largement repris, liés aux sciences de la complexité et à théorie du chaos, et investis d'un rôle symbolique et métaphorique. Mais dès la fin de la décennie, la mode fractale s'essouffle suite aux critiques qui ridiculisent son usage jugé excessif ou superficiel. Dans les années 1990, la géométrie fractale est souvent perçue comme un simple « *gimmick* », même si des approches plus rigoureuses apparaissent, comme celle de Carl Bovill. Ostwald conclut que cette relation est surtout opportuniste et métaphorique, rarement ancrée dans une compréhension

scientifique profonde, et que son avenir dépendra d'une reconnaissance mutuelle entre architectes et mathématiciens.

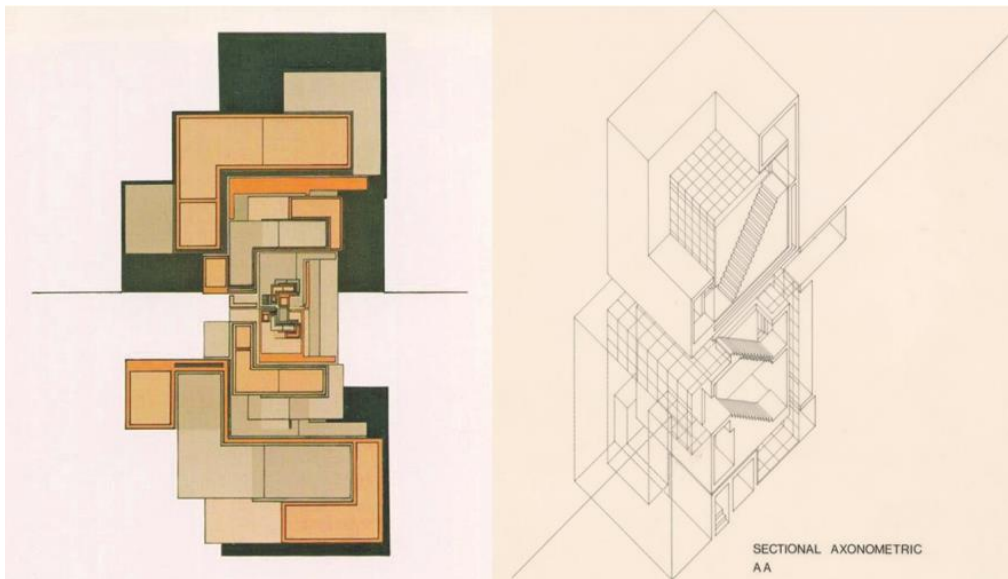


Figure 6.15. Vues en coupe et en axonométrie de la « House 11a ». Source : <https://www.cca.qc.ca/fr/archives/380476/peter-eisenman-fonds/387751/projects/391314/house-11a>, consulté en Décembre 2024.

Dans une vision synthétique, Haghani (2009, p. 134) regroupe les recherches et les applications de l'architecture fractale en deux grands courants. Le premier concerne l'évaluation et l'analyse fractale d'ouvrages existants ; le second porte sur la conception architecturale fondée sur les principes fractals. Ces deux approches, largement explorées par les chercheurs, les architectes et les concepteurs, offrent des perspectives distinctes mais complémentaires. Elles envisagent toutes deux la géométrie fractale comme un outil quantifiable permettant de décrire la complexité formelle d'une réalisation architecturale et de mesurer le degré selon lequel elle peut être considérée comme fractale :

- Les fractales comme outil d'analyse critique : Cette approche vise à mesurer la complexité de la forme d'un projet ou d'une conception. Elle repose sur le calcul de la dimension fractale des réalisations architecturales pour permettre leur évaluation.
- L'approche fractal comme outil de conception : Cette approche cherche à simuler des formes naturelles ou à appliquer des formes similaires de différentes tailles aux différentes échelles d'un projet architectural. Elle vise à créer une forme complexe sous-tendant un ordre subtil à différentes couches d'une structure architecturale, revendiquant une ressemblance avec ce qui se passe dans la création des formes naturelles.

4.1. Les fractales comme outil d'analyse critique

Mesurer la dimension fractale constitue un outil quantifiable pour évaluer mathématiquement le degré de complexité (qualité fractale) manifesté par une conception (Ostwald et Vaughan,

2016).. De nombreux chercheurs ont mesuré la dimension fractale afin d'évaluer de manière critique des éléments architecturaux et urbains. On peut citer les travaux de Bovill (1996) pour des comparaisons de façades de bâtiments, de Cooper et Oskrochi (2008) pour l'évaluation de perspectives de rues, et de Stamps (2002) pour l'analyse de skylines urbaines.

Bovill (1996, p.119) suggère que la dimension fractale d'une œuvre architecturale peut être mesurée et utilisée comme un outil critique. Il affirme que « *le manque de progression texturale pourrait aider à expliquer pourquoi une partie de l'architecture moderne n'a jamais été acceptée par le grand public* ». Comme présentée dans la figure 6.16, Il utilise la méthode du comptage de boîtes pour mesurer la dimension fractale de deux façades célèbres : la Robie House de Frank Lloyd Wright et la Villa Savoye de Le Corbusier. À grande échelle (12 à 2 pieds), la Robie House présente une dimension fractale légèrement plus élevée, signe d'une complexité formelle supérieure. À petite échelle (2 pieds à 1,5 pouce), la différence devient marquée : la Robie House conserve une dimension fractale élevée (1,721 et 1,626), tandis que celle de la Villa Savoye chute à 1,00, révélant une absence de progression des détails. Bovill interprète cela comme la traduction, chez Wright, d'une conception organique inspirée de la complexité et de l'ordre de la nature, contrairement au purisme industriel de Le Corbusier.

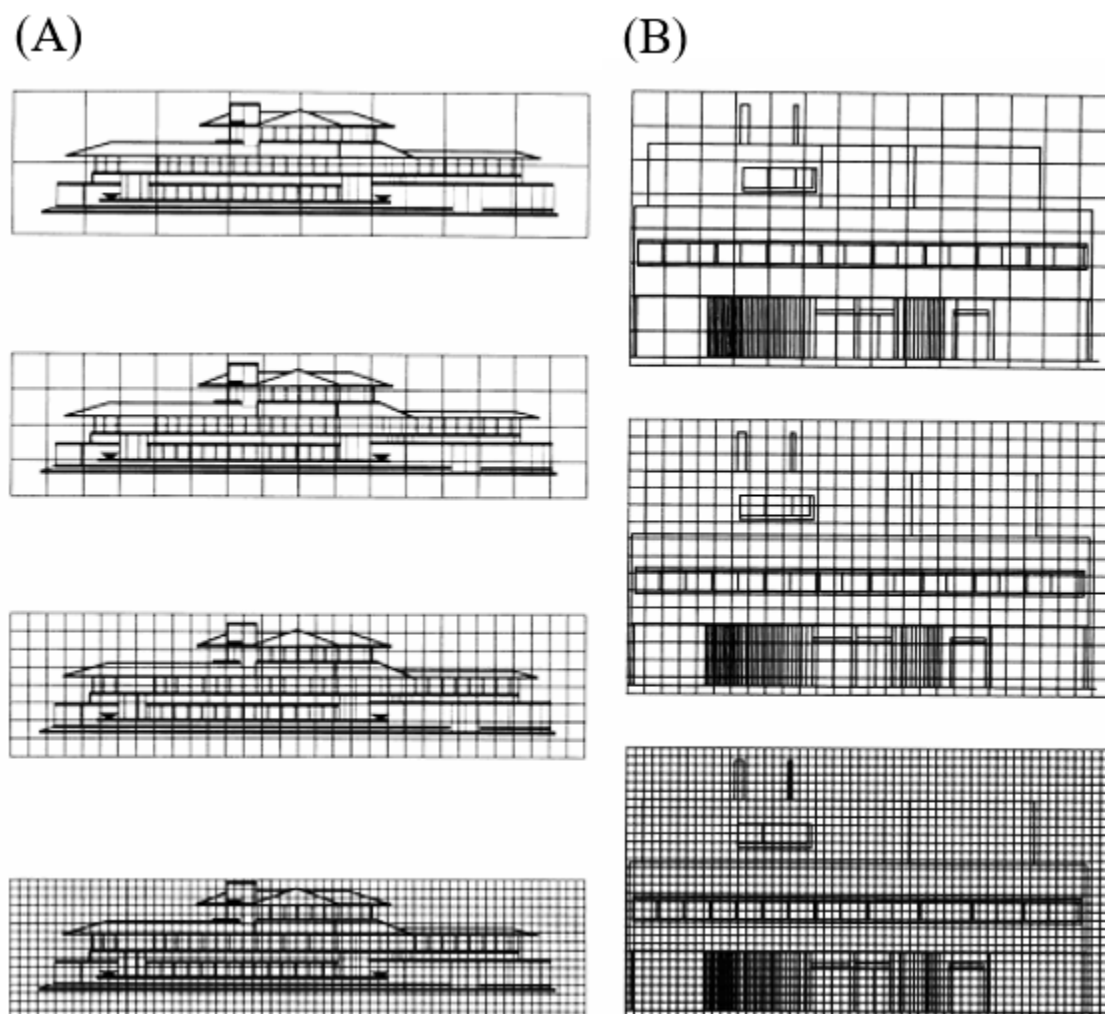


Figure 6.16. Mesure de la dimension fractale des maisons modernes célèbres : (A) Robie house ; (B) La villa Savoye. Source : Bovill (1996)

En effet, Bovill (1996, p. 127) souligne que bien avant la formalisation de la géométrie fractale, certains architectes en appliquaient déjà les principes fondamentaux. Wright, par exemple, concevait ses projets selon une cohérence d'échelle, l'itération d'un motif générateur et d'une inspiration issue de la structure profonde de la nature. Cette démarche, proche de l'autosimilarité fractale et de la richesse infinie des ensembles fractales de Julia, se reflète dans ses propres mots : « *Une forme tout à fait différente peut servir à un autre, mais d'une idée de base unique, tous les éléments du design sont dans chaque cas dérivés et bien maintenus ensemble en échelle et en caractère. La forme choisie peut s'évaser vers l'extérieur, s'ouvrir comme une fleur vers le ciel ; une autre, être neutre ou abruptement emphatique, ou sa grammaire peut être déduite d'une forme végétale qui m'a plu... Mais dans chaque cas, le motif est adhérent du début à la fin de sorte qu'il n'est pas exagéré de dire que chaque bâtiment est esthétiquement coupé d'une seule pièce et tient constamment ensemble avec une intégrité impossible autrement* ». Cette analyse trouve assui ses fondements chez Jencks (1997, p.43) en déclarant : « *...ceux qui se qualifient d'architectes organiques imitent souvent les schémas d'organisation de la nature et, dans leurs designs, répètent naturellement une idée formelle à de nombreuses échelles et, tout aussi inévitablement qu'une fleur, offrent plusieurs points focaux* ».

4.2. Les fractales comme outil de conception

Joye (2007) évoque le potentiel des fractales pour générer un ornement architectural riche, reproductible à faible coût grâce à l'informatique, et pour servir de paradigme dans la conception de bâtiments, offrant automatiquement une variété extrême reconnue comme essentielle au bien-être humain, mais difficile à obtenir par des méthodes manuelles. Cette perspective conduit à examiner deux catégories de réalisations : le style fractal, fondé sur l'autosimilarité, et le rythme fractal, associé à une qualité visuelle et à une richesse formelle (Haghani, 2009, p.136). Ces deux approches présentent un potentiel pour doter les concepteurs d'outils capables de produire des formes en cohérence avec leur environnement.

4.2.1. L'approche d'autosimilarité

Jencks (1997, p.43) déclara : « *C'est un truisme que tous les organismes et l'architecture doivent présenter une certaine autosimilarité...* ». Bien que l'autosimilarité dans la production de fractales soit un concept récent, Joye (2007) rappelle que l'usage des principes fractals en art et en architecture n'a jamais été limité depuis les années 1970. Même avant la formalisation mathématique des fractales, des architectures comme les temples hindous manifestaient déjà une hiérarchie autosimilaire (Rian et al., 2007). Crompton (2002) et Lorenz (2003) ont montré que le style gothique, notamment à Cologne et Lincoln, présente cette propriété à toutes les échelles : dans chaque cas, un arc brisé relie également deux des quatre combinaisons restantes (voir figure 6.18). Crompton (2002) établit des analogies avec la fractale de Koch, et la fractale « escalier du diable » de Mandelbrot et des éléments gothiques ou doriques, définissant un bâtiment fractal comme répétant une forme sur plusieurs ordres de grandeur. De son côté, Sala (2006) applique une analyse similaire à l'architecture baroque, en particulier à l'église « *San Carlo alle Quattro Fontane de Francesco Borromini* » à Rome et « *Santa Croce* » à Florence. Elles illustrent l'utilisation de la géométrie fractale, leurs motifs

et formes architecturaux s'y répètent à différentes échelles, produisant une auto-similarité qui confère aux églises une complexité visuelle et spatiale équilibrée et harmonieuse.

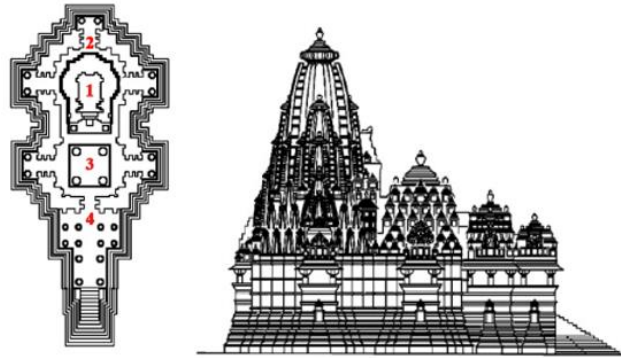


Figure 6.17. Autosimilarité dans les temples hindous illustrée en plan et en façade. Source : Rian et al. (2007)

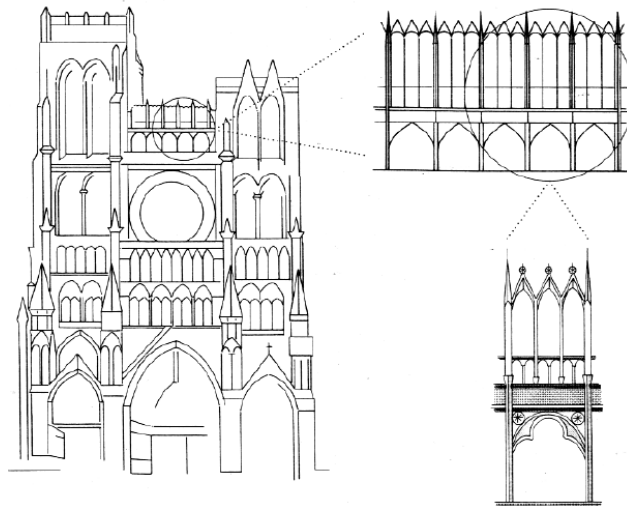


Figure 6.18. Autosimilarité dans les églises gothiques illustrée en coupe. Source : Lorenz (2003)

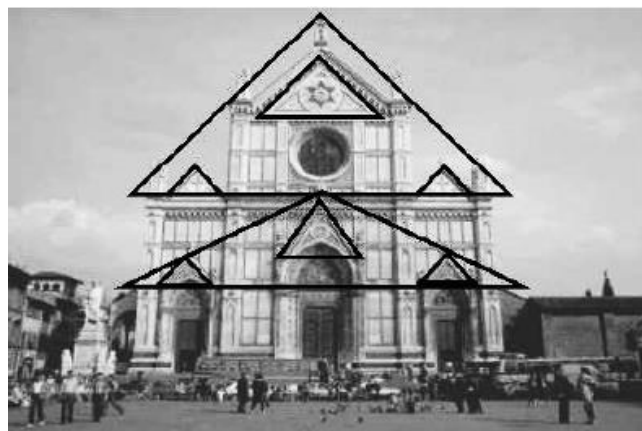


Figure 6.19. Autosimilarité de la façade de l'église « Santa Croce » de Florence. Source : Sala (2006)

Jencks (1997, p. 43) définit l'autosimilarité comme une similitude transformationnelle pas une réplique exacte de l'auto-identité. Il affirme que la maison Price de Bruce Goff illustre cette complexité : « *Des triangles, des hexagones et des tri hexagones autosimilaires organisent sa maison Price – du très grand au plus petit détail* ». Il mentionne aussi que des projets plus récents, comme l'extension du Victoria and Albert Museum par Daniel Libeskind (voir figure 6.21), combinent grandes formes fractales et autres plus petites. Enfin, Crompton (2002) admet que les exemples récents présentant une qualité fractale encore plus difficile à trouver. Il suggère que les célèbres appartements de l'ouest d'Amsterdam des architectes MVRDV répètent une forme de boîte sur trois niveaux. Bien que cet exemple montre clairement la tentative de ses architectes de produire une pièce d'architecture fractale, l'occasion de poursuivre la progression en dessous de la taille du balcon n'est pas saisie, et il manque donc les détails à petite échelle que l'on retrouve dans la nature.

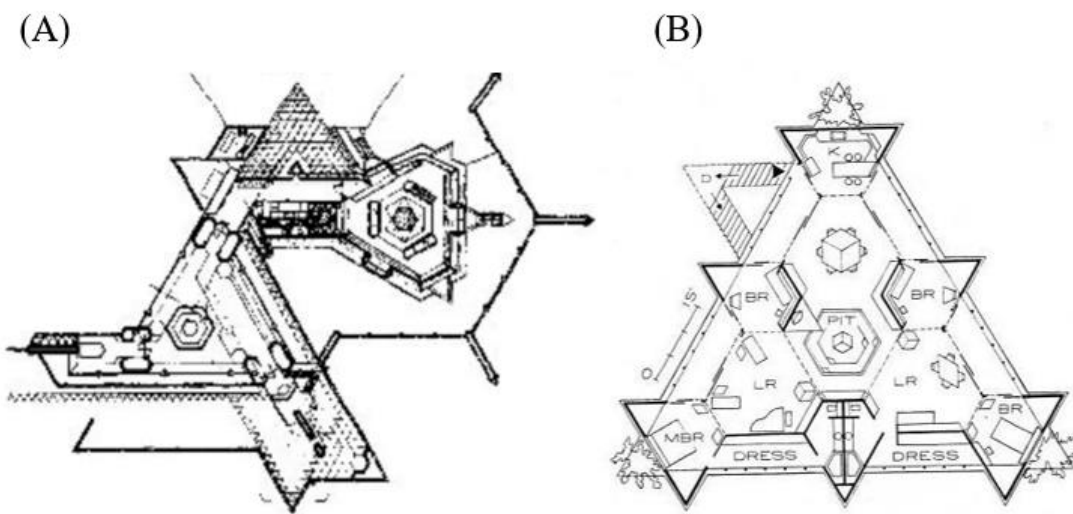


Figure 6.20. Conception fractale de Bruce Goff : (A) Plan de la maison Price ; (B) Plan de la maison Gutman.

Source : <https://www.philipsteadman.com/blog/the-house-of-the-faraway-heart/>, consulté en Décembre 2024

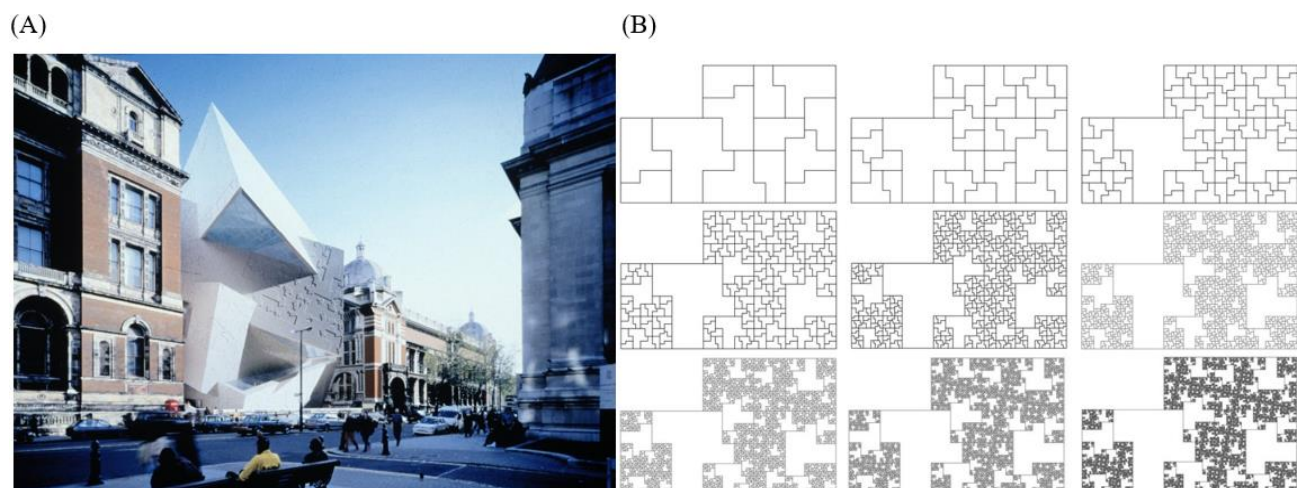


Figure 6.21. Victoria and Albert Museum, exemple de conception fractale : (A) Vue sur la volumétrie ; (B) motifs fractals en façades. Source : <https://www.archdaily.com/768565/ad-classics-v-and-a-spiral-daniel-libeskind-plus-cecil-balmond>, consulté en Décembre 2024.

4.2.2. L'approche du rythme fractal

Le rythme fractal désigne une unité avec variété, offrant, selon Bovill (1996, p. 6), une source inépuisable d'idées de conception pour exprimer une compréhension complexe de la nature. Contrairement à l'autosimilarité stricte, il se manifeste par un ordre rythmique à différentes échelles, comme dans l'œuvre de Lucien Kroll, ou dans de nombreux bâtiments anciens, riches en couches et en formes. Crompton (2002) note que la plupart des bâtiments modernes ne sont pas fractals car ils utilisent de grandes surfaces pures, évitent la décoration et emploient des formes simples, ce qui contribue à leur aspect oppressif et artificiel. Par contre, certains modernistes tels qu'Aalto et Wright, ont néanmoins produit des rythmes complexes cohérents avec l'environnement, atteignant une complexité fractale avant même la formalisation du concept (Jencks, 1997). L'élévation de la maison et du bureau d'Aalto illustre, selon Bovill (1996, p. 112), comment la variation de la taille des fenêtres et des panneaux muraux fait écho à la variabilité de l'espacement des arbres dans la forêt.



Figure 6.22. Rythme fractal dans la façade des logements pour les étudiants en médecine à l'université Catholique de Louvain ; conception de Lucien Kroll en 1970. Source : <https://www.architectural-review.com/essays/reputations/lucien-kroll-1927>, consulté en Décembre 2024.

5. Application des fractales dans l'architecture et l'urbanisme islamiques

Après avoir examiné l'application des fractales à l'architecture en général, nous nous intéressons ici plus spécifiquement à l'architecture et à l'urbanisme islamiques. Les formes traditionnelles islamiques présentent naturellement des caractéristiques fractales, telles que l'autosimilarité et la hiérarchie d'échelles. L'objectif est de montrer comment les principes fractals permettent de décrire, d'analyser et d'interpréter la richesse formelle des édifices et des structures urbaines. Nous mettrons l'accent sur les travaux de recherche consacrés à cette thématique, afin de mettre en évidence les apports de la fractalité dans l'analyse et la compréhension de ces architectures et de ces tissus urbains.

En effet, dans les quinze dernière on assiste à un intérêt grandissant pour l'application des théories de la complexité, notamment les fractales, dans l'étude de l'architecture et de l'urbanisme islamiques. Dans cette perspective, Ben Hamouche (2009) explore comment la géométrie fractale permettent d'expliquer la complexité et l'irrégularité apparente des tissus

urbains traditionnels islamiques. Il part d'un constat : l'urbanisme islamique historique est souvent jugé désordonné et chaotique lorsqu'on l'évalue à travers le prisme de la géométrie euclidienne, héritée des modèles gréco-romains. Il propose de renverser ce point de vue en montrant que cette irrégularité n'est pas un défaut mais le signe d'un ordre caché, produit par une multitude de microdécisions locales sur de longues périodes. Pour démontrer cette idée, il mobilise des concepts clés de la fractalité : autosimilarité, croissance fractale, imprévisibilité, bifurcations. L'autosimilarité se présente dans la répétition de structures similaires à différentes échelles : de la ville entière au quartier, puis à l'îlot et enfin à la maison. La maison à cour, par exemple, est perçue comme une mini-ville qui reproduit à petite échelle l'organisation du tissu urbain. La croissance fractale se manifeste dans l'expansion urbaine par petites touches : ajouts de pièces, extensions de rues, subdivisions de parcelles, résultant en un raffinement croissant des formes.

En réalité, la thèse majeure de cette approche est le lien établi entre cette morphogenèse urbaine complexe et les règles juridiques islamiques. Ben Hamouche (2009) montre comment des principes comme la *wilaya* (pouvoir d'agir sur sa propriété tant qu'on ne nuit pas à autrui), le droit de préemption « *shuf'aa* », le partage successoral « *mawarith* » et le système de régulation des marchés et des voies « *hisba* » façonnent directement l'espace urbain. Ces règles, en encadrant mais aussi en autorisant de nombreuses micro-interventions, produisent un tissu en perpétuelle adaptation. Elles favorisent la fois la fragmentation (par héritage) et la recomposition (par préemption), tout en modulant les relations entre privé et public dans la rue. la distinction entre deux logiques de production urbaine : un processus linéaire, centralisé, appliqué par les autorités publiques pour les grands ouvrages (remparts, portes, mosquées), et un processus non-linéaire, décentralisé, issu des décisions privées ou collectives à l'échelle des habitants. C'est l'interaction constante entre ces deux logiques qui donne naissance à la morphologie riche et organique des médinas. Cette approche permet de comprendre comment, malgré l'absence de plan directeur rigide, les villes ont pu croître et se densifier tout en maintenant une cohérence d'ensemble.

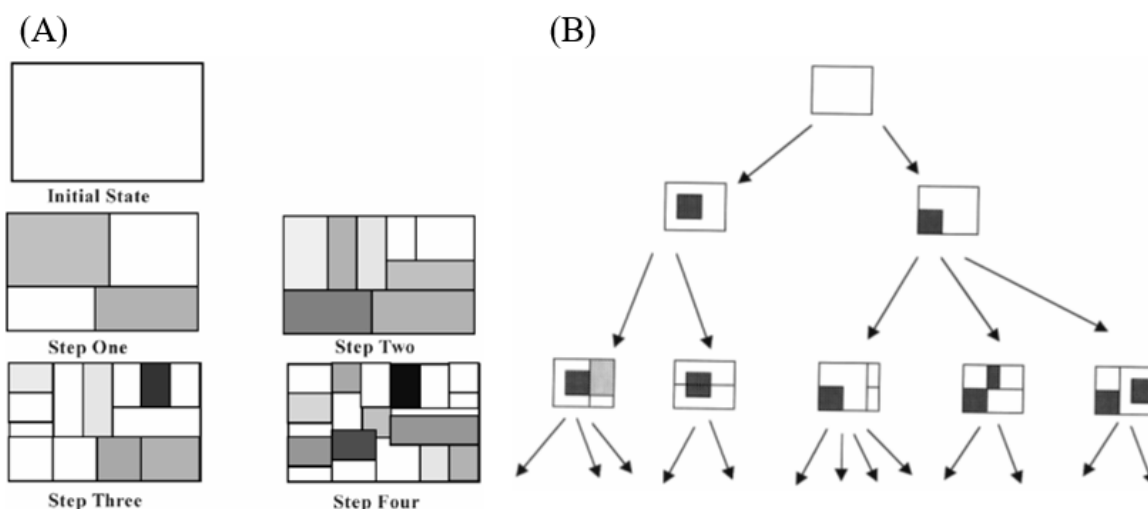


Figure 6.23. Fractalité de la ville islamique traditionnelle : (A) Division fractale à l'échelle de l'îlot ; (B) bifurcation et genèse à l'échelle de la maison. Source Ben Hamouche (2009)

Ben Hamouche (2011) continue dans la même perspective en explorant l'impact du droit successoral islamique « *mawarith* » sur la morphologie des villes islamiques traditionnelles. En mobilisant les fractales, il propose une interprétation alternative : ces formes urbaines résultent d'un processus itératif de subdivision des biens, inscrit dans les règles précises de partage des héritages. La fractalité est ici comprise à la fois dans son sens mathématique (autosimilarité) et dans un sens étymologique élargi (fraction), en référence aux parts d'héritage. Le droit successoral islamique, tel que décrit, repose sur un système combinant prescriptions religieuses et équité sociale. Trois catégories d'héritiers sont identifiées : les « *ashab al-furūd* » (bénéficiaires de parts fixes), les « *asabah* » (résiduaire qui héritent du reste) et, en dernier ressort, les parents éloignés. Les parts sont calculées selon des fractions normalisées ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, ...) et s'ajustent si la somme dépasse la totalité de l'actif. Cette mécanique, issue notamment des travaux algébriques, se traduit physiquement par la nécessité de découper le bien en parts réelles proportionnelles, souvent en tenant compte de contraintes fonctionnelles (accès, lumière, eau) et de la valeur relative des différents espaces. L'un des apports majeurs de cette approche est de montrer comment ces règles juridiques, répétées à chaque génération, produisent une fragmentation spatiale observable. Chaque décès déclenche une nouvelle itération du processus : la parcelle initiale est subdivisée selon les parts prescrites, générant de nouvelles limites, ruelles ou impasses pour desservir les nouveaux lots. Au fil du temps, cela crée des configurations arborescentes et des trames viaires en cul-de-sac caractéristiques des villes islamiques (voir figure 6.23).

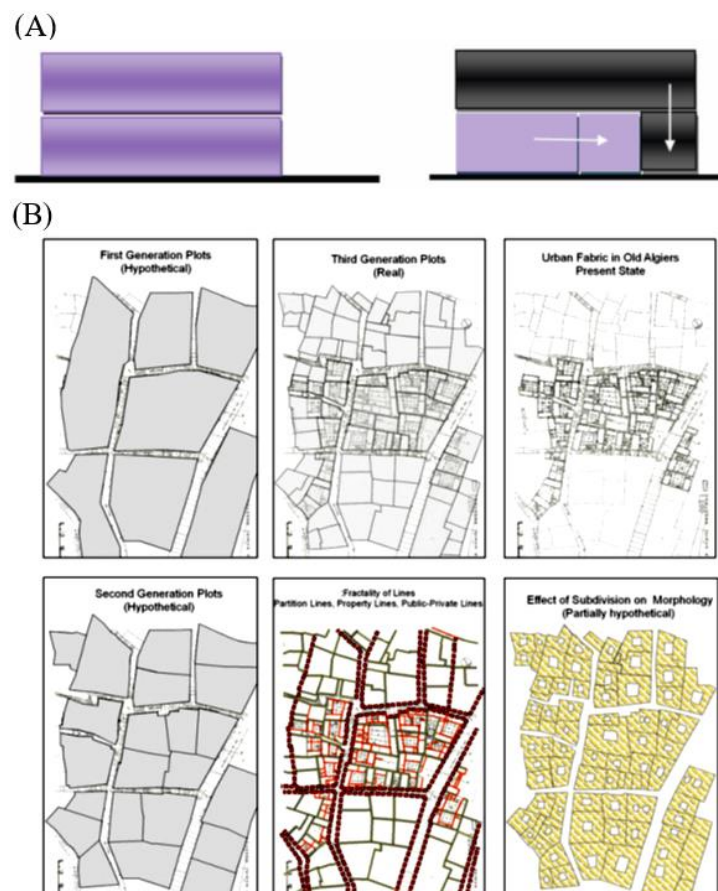


Figure 6.24. Droit islamique « *mawarith* » et division fractale : (A) : à l'échelle de l'ilot ; (B) à l'échelle du quartier. Source : Ben Hamouche (2011).

Parallèlement, Reza et Dincyurek (2016) ont analysaient les tissus urbains des villages traditionnels iraniens à travers la dimension fractale obtenue par la méthode du « *box-counting* ». Des villages en terrasses construits sur une pente avoisinant les 45° , présentent un maillage organique composés de maisons imbriquées, de toits utilisés comme espaces publics, de passages sinueux parallèles aux courbes de niveau et reliés par des escaliers. L'analyse fractale, réalisée en plusieurs itérations de quadrillage, établit une dimension comprise entre 1,54 et 1,69 pour l'organisation urbaine. Cette valeur reflète un niveau de complexité notable, bien que légèrement inférieur à celui des façades, et traduit une autosimilarité qui, sans être maximale, reste caractéristique d'un système fortement influencé par les contraintes topographiques et les usages sociaux. Ce type d'organisation hiérarchique et adaptative démontre une optimisation de l'espace, où la morphologie urbaine répond simultanément aux besoins de circulation, de cohésion sociale et d'intégration au paysage. Pour les auteurs, ces résultats illustrent l'intérêt de s'inspirer de la logique fractale de tels tissus urbains afin de concevoir des modèles d'habitat contemporain à la fois denses, fonctionnels et respectueux de leur environnement naturel et culturel.

En plus des applications à l'échelle urbaine, différentes recherches ont également exploré des applications à l'échelle architecturale. Abdelsalam et Ibrahim (2019) analysent la madrasa mamelouke de « *Al-Sultan Hassan* » comme un exemple abouti de morphogenèse fractale en architecture islamique, où un carré initial, régulé par des proportions telles que la racine de 2 et le nombre d'or, subit des transformations itératives (subdivisions, branchements, rotations, translations) générant une hiérarchie d'espaces et de motifs autosimilaires, du plan général aux détails ornementaux (sols, muqarnas, décor mural). Les auteurs mesurent sa dimension fractale (1,16) et développent un modèle paramétrique interactif (Rhino, Grasshopper, Python) capable à la fois de retracer les règles géométriques du plan et de produire une infinité de variantes respectant ce langage formel. Cette méthode, combinant géométrie euclidienne et fractale, offre un outil pour l'analyse, la préservation, la génération et la transformation stylistique, démontrant que cette œuvre historique est un système géométrique évolutif apte à inspirer des créations contemporaines.

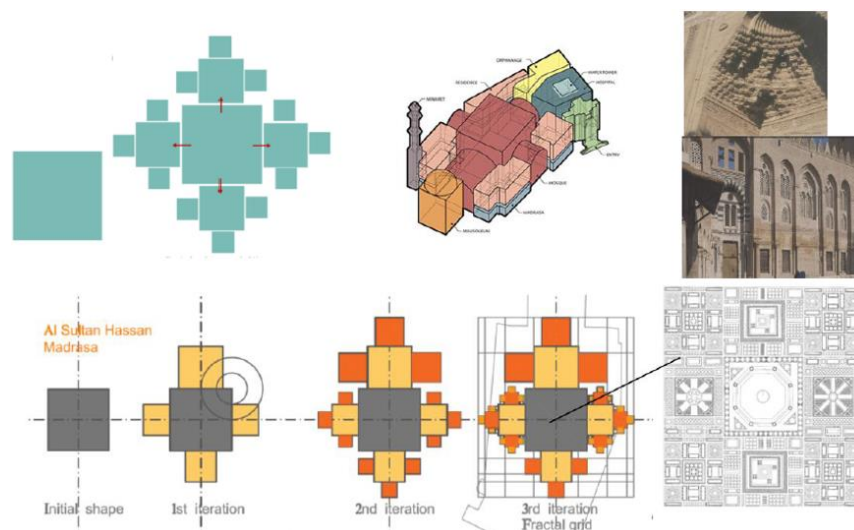


Figure 6.25. Autosimilarité et genèse fractale de la madarsa d'Al Sultan Hassan. Source : Abdelsalam et Ibrahim (2019)

De son côté, Rezazade (2021) montre que les ornements islamiques comme les « *muqarnas* » présentent des propriétés d'autosimilarité, de répétition, de changement d'échelle et de dimension non entière. Par l'analyse fractale des comptages de boîtes, il calcule les dimensions fractales du plan, de l'élévation, de la section et du décor intérieur, révélant une cohérence mathématique fondée sur des progressions géométriques régulières. Cette organisation, inspirée de la nature et imprégnée de symbolique islamique, exprime l'unité dans la diversité et guide le visiteur par une hiérarchie d'espaces vers le dôme central. Finalement, Patuano et Lima (2021) analyse les jardins islamiques et persans « *Chahár-Bâgh* » à travers une méthode combinant analyse visuelle et calcul de dimension fractale (. Appliquée au jardin du Taj Mahal et au plan de la ville d'Ispahan. Les résultats montrent que ces compositions présentent une autosimilarité et une invariance d'échelle marquées ($D \approx 1,8$ pour le Taj Mahal, $D \approx 1,72-1,83$ pour Ispahan), traduisant à la fois une optimisation fonctionnelle de la distribution de l'eau et une symbolique forte liée à l'infini divin, à la justice et à l'ordre cosmique. Malgré des limites méthodologiques (fiabilité des plans anciens, sensibilité des paramètres du box-counting, échantillon restreint), l'étude met en lumière la dimension à la fois mathématique, esthétique et spirituelle de ces jardins, et ouvre des perspectives pour appliquer cette approche à d'autres échelles de conception urbaine.

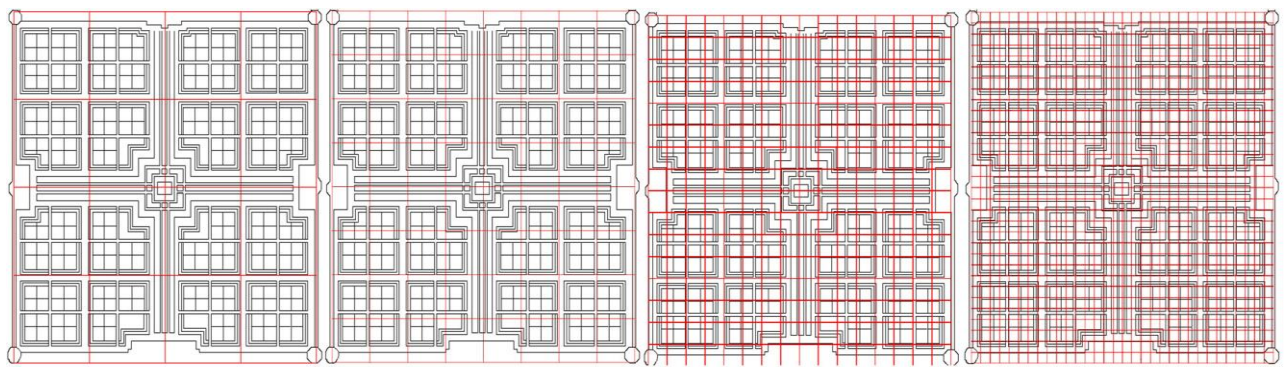


Figure 6.26. Méthode de comptage de boîte et calcul de la dimension fractale du jardin « *Chahár-Bâgh* ».

Source : Patuano et Lima (2021)

Bien que ces travaux offrent un éclairage original sur l'architecture et l'urbanisme islamiques en mobilisant la géométrie fractale, mais elles se limitent souvent à deux aspects : la ressemblance visuelle et la mesure de la dimension fractale comme unique indicateur. Cela permet d'identifier des formes répétitives, des hiérarchies d'échelles et une certaine autosimilarité, mais sans vraiment prouver le lien avec les processus réels de formation des villes et des bâtiments. Or, ces formes ne sont pas seulement le résultat d'une logique géométrique : elles viennent aussi de l'action combinée de contraintes physiques, de règles juridiques, d'habitudes sociales, de facteurs économiques et de significations symboliques. Se contenter de mesurer ou de décrire la fractalité risque donc d'oublier ces dimensions essentielles et de confondre ce qui est visible avec ce qui explique vraiment la forme. Pour que la fractalité serve vraiment à comprendre ces espaces, il faut la replacer dans un cadre plus large, celui des systèmes complexes, et la relier à des données concrètes sur l'histoire et le fonctionnement social de ces villes.

. Conclusion

Ce chapitre a pour objectif de présenter la géométrie fractale comme un modèle formel et opératoire pour analyser, comprendre et modéliser la morphogenèse urbaine dans une perspective de complexité. En retraçant ses fondements historiques et conceptuels, en définissant ses caractéristiques essentielles : irrégularité, autosimilarité, invariance d'échelle, dimension fractale et en explorant ses applications en urbanisme et en architecture, il a montré que les fractales offrent bien plus qu'une représentation géométrique : elles constituent un langage de la complexité reliant intimement forme et processus à travers les échelles.

En tant que modèle formel, elles reproduisent la formation de structures hiérarchisées à partir de règles locales simples ; comme outil descriptif, elles fournissent des indicateurs quantitatifs pour mesurer la rugosité, la densité et la hiérarchie des formes urbaines ; enfin, comme métaphore scientifique, elles rendent visible l'ordre caché au sein du désordre apparent, incarnant les principes d'auto-organisation et d'émergence propres aux systèmes complexes.

Cependant, l'analyse fractale des villes doit s'accompagner d'une prudence méthodologique : toutes les formes urbaines ne sont pas strictement fractales, et la validité des mesures dépend des méthodes et des échelles considérées. La fractalité urbaine apparaît souvent comme approximative, limitée par les échelles, et modulée par des facteurs sociaux, économiques et politiques qui échappent au seul modèle géométrique. Ainsi, en liant modèle mathématique et application urbaine, ce chapitre a montré que la géométrie fractale peut être un outil central pour analyser et interpréter les morphogenèses urbaines, en particulier celles des villes islamiques traditionnelles, dont la structure adaptative et hiérarchique constitue un terrain privilégié pour appliquer et tester le paradigme fractal.

. Notes et références bibliographiques

- Mandelbrot, B. (1967). How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 156(3775), 636–638. <https://equant.org/articles/fractal-geometry/img/howLongIsTheCoastOfBritain.pdf>.
- Mandelbrot, B. (1982). *The fractal geometry of nature*. San Francisco: W. H. Freeman.
- Gleick, J. (2011). *Chaos: Making a new science* [eBook edition]. New York, NY: Open Road Media.
- Debnath, L. (2006). A brief historical introduction to fractals and fractal geometry. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 37(1), 29–50. <https://doi.org/10.1080/00207390500186206>.
- Dauphiné, A. (2011). *Géographie fractale : Fractals auto-similaire et auto-affine*. Paris : Hermès-Lavoisier.
- Barnsley, M. F. (2014). *Fractals everywhere* (2nd ed.) [eBook edition]. Academic Press.
- Falconer, K. (2003). *Fractal geometry: Mathematical foundations and applications* (2nd ed.) [eBook edition]. Wiley.
- Eglash, R. (1999). *African fractals: Modern computing and indigenous design*. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press.

- Frankhauser, P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Paris : Anthropos (collection « Villes »).
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour* [eBook]. Oxford University Press.
- Theise, N. D. (2023). *Notes on complexity: A scientific theory of connection, consciousness, and being* [eBook]. Spiegel & Grau.
- Batty, M. (2005). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Balmaceda, B., et Fuentes, M. A. (2016). Cities and methods from complexity science. *Journal of Systems Science and Complexity*, 29(5), 1177–1186. <https://doi.org/10.1007/s11424-016-6084-2>.
- Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude : Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste* [Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d'Azur, Nice].
- Dauphiné, A. (2003). *Les théories de la complexité chez les géographes*. Paris : Anthropos (Économica).
- Vicsek, T. (1992). *Fractal growth phenomena* (2nd ed.). Singapore: World Scientific.
- Turcotte, D. L. (2012). *Fractals and chaos in geology and geophysics* (2nd ed.). Cambridge, UK : Cambridge University Press.
- West, G. B., Brown, J. H., & Enquist, B. J. (1997). A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*, 276(5309), 122–126. <https://doi.org/10.1126/science.276.5309.122>.
- Goldberger, A. L., Amaral, L. A. N., Hausdorff, J. M., Ivanov, P. C., Peng, C.-K., & Stanley, H. E. (2002). Fractal dynamics in physiology: Alterations with disease and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(suppl 1), 2466–2472. <https://doi.org/10.1073/pnas.012579499>.
- Batty, M., et Longley, P. (1994). *Fractal cities: A geometry of form and function* [eBook edition]. Academic Press.
- Basili, L. L. (1998). The fractal geometry of urban organisation: Beyond the crisis of 'spontaneous order'. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 267–295). Heidelberg: Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_8.
- Wagner, R. (1991). The fractal person. In M. Godelier & M. Strathern (Eds.), *Big men and great men: Personifications of power in Melanesia* (pp. 159-173). Cambridge University Press.
- Mosko, M. S. (2009). The fractal yam: Botanical imagery and human agency in the Trobriands. *Journal of the Royal Anthropological Institute*, 15(4), 679–700. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9655.2009.01579.x>.
- Sokal, A., et Bricmont, J. (1998). *Fashionable nonsense: Postmodern intellectuals' abuse of science*. New York, NY: Picador.
- Cilliers, P. (1998). *Complexity and postmodernism: Understanding complex systems*. London : Routledge.
- Oswald, M. (2009). *Fractals architecture : Knowledge formation within and between architecture and the sciences of complexity*. Berlin: Jovis Verlag.
- Haghani, T. (2009). *Fractal geometry, complexity and the nature of urban morphological evolution: Developing a fractal analysis tool to assess urban morphological change at neighbourhood level* [Thèse de doctorat, Birmingham City University]. Grande Bretagne, Birmingham City University.
- Bertuglia, C. S., Bianchi, G., et Mela, A. (1998). Introduction. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 1–18). Heidelberg: Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_1.

- Pumain, D. (1998). Urban research and complexity. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 323–337). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_10.
- Salingaros, N. A., Coward, L. A., West, B. J., et van Bilsen, A. (2005). *Principles of urban structure*. Amsterdam: Techne Press.
- Oliveira, V. (2016). *Urban morphology: An introduction to the study of the physical form of cities*. Cham : Springer International Publishing.
- Jiang, B., & Yin, J. (2013). Ht-index for quantifying the fractal or scaling structure of geographic features. *Annals of the Association of American Geographers*, 104(3), 530–540. <https://doi.org/10.1080/00045608.2013.834239>.
- Jiang, B., & Ma, D. (2018). How complex is a fractal? Head/tail breaks and fractional hierarchy. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 2(1), Article 6. <https://doi.org/10.1007/s41651-017-0009-z>.
- Frankhauser, P. (1998). Fractal geometry of urban patterns and their morphogenesis. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2(4), 347–357. <https://doi.org/10.1155/S1026022698000107>.
- Terzi, F., et Kaya, H. S. (2011). Dynamic spatial analysis of urban sprawl through fractal geometry: The case of Istanbul. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 38(1), 175–190. <https://doi.org/10.1068/b35096>.
- Tucek, P., & Janoska, Z. (2013). Fractal dimension as a descriptor of urban growth dynamics. *Neural Network World*, 23(2), 93–102. <https://doi.org/10.14311/NNW.2013.23.007>.
- Chen, Y. (2020). Fractal modeling and fractal dimension description of urban morphology. *Entropy*, 22(9), 961. <https://doi.org/10.3390/e22090961>.
- Man, X., et Chen, Y. (2020). Fractal-based modeling and spatial analysis of urban form and growth: A case study of Shenzhen in China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11), 672. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110672>.
- McAdams, M. A. (2007). Fractal analyses and the urban morphology of a city in a developing country: A case study of İstanbul. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 15, 150–171. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/3133>.
- Feng, J., & Chen, Y. (2010). Spatiotemporal evolution of urban form and land-use structure in Hangzhou, China: Evidence from fractals. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(5), 838–856. <https://doi.org/10.1068/b35078>.
- Chen, Y.-G. (2018). Logistic models of fractal dimension growth of urban morphology. *Fractals*, 26(3), 1850033. <https://doi.org/10.1142/S0218348X18500330>.
- Kim, J. S., Goh, K.-I., Kahng, B., & Kim, D. (2007). Fractality and self-similarity in scale-free networks. *New Journal of Physics*, 9(6), 177. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/9/6/177>.
- Lu, Z., Zhang, H., Southworth, F., & Crittenden, J. (2016). Fractal dimensions of metropolitan area road networks and the impacts on the urban built environment. *Ecological Indicators*, 70, 285–296. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X16303168?via%3Dihub>.
- Benguigui, L. (1992). The fractal dimension of some railway networks. *Journal de Physique I*, 2(4), 385–388. <https://doi.org/10.1051/jp1:1992151>.
- Benguigui, L. (1995). A fractal analysis of the public transportation system of Paris. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 27(7), 1147–1161. <https://doi.org/10.1068/a271147>.

- Rodin, V., et Rodina, E. (2000). The fractal dimension of Tokyo's streets. *Fractals*, 8(4), 413–418. <https://doi.org/10.1142/S0218348X00000457>.
- Lu, Y., et Tang, J. (2004). Fractal dimension of a transportation network and its relationship with urban growth: A study of the Dallas-Fort Worth area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(6), 895–911. <https://doi.org/10.1068/b31163>.
- Sun, Z., Jia, P., Kato, H., & Hayashi, Y. (2007). Distributive continuous fractal analysis for urban transportation network. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 7, 1519–1531. <https://sunzhuo.users.sourceforge.net/res/100457.pdf>.
- Mo, Y., Liu, J., & Lv, S. (2015). GIS-based analysis of fractal features of the urban road network. *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, 845–848. <https://doi.org/10.1109/ICSESS.2015.7339187>.
- Zhang, H., Lan, T., & Li, Z. (2021). Fractal evolution of urban street networks in form and structure: A case study of Hong Kong. *International Journal of Geographical Information Science*, 36(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/13658816.2021.1974451>.
- Lu, Z., Zhang, H., Southworth, F., & Crittenden, J. (2016). Fractal dimensions of metropolitan area road networks and the impacts on the urban built environment. *Ecological Indicators*, 70, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.016>.
- Kim, K. S., Benguigui, L., & Marinov, M. (2003). The fractal structure of Seoul's public transportation system. *Cities*, 20(1), 31–39. [https://doi.org/10.1016/S0264-2751\(02\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0264-2751(02)00094-X).
- Xu, Z., Xing, L., Zhou, F., & Wang, Y. (2010). Fractal characteristics of transportation network of Tianjin city. In 2010 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA) (pp. 356–359). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2010.5588295>.
- Ma, D., Guo, R., Zheng, Y., Zhao, Z., He, F., & Zhu, W. (2020). Understanding Chinese urban form: The universal fractal pattern of street networks over 298 cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), Article 192. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040192>.
- De Keersmaecker, M.-L., Frankhauser, P., & Thomas, I. (2003). Using fractal dimensions to characterize intra-urban diversity: The example of Brussels. *Geographical Analysis*, 35(4), 310–328. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2003.tb01117.x>.
- Thomas, I., Frankhauser, P., & De Keersmaecker, M.-L. (2013). Fractal dimensions of the built-up footprint: Buildings versus roads. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40(2), 310–329. <https://doi.org/10.1068/b38218>.
- Wang, H., Luo, S., & Luo, T. (2017). Fractal characteristics of urban surface transit and road networks: Case study of Strasbourg, France. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(2), 1–10. <https://doi.org/10.1177/1687814017692289>.
- Pumain, D. (2017). *About fractal models in urban geography and planning: Refuting the aesthetics and the universal norm* [Cybergeography Conversation]. <https://cybergeography.hypotheses.org/22>.
- Terzi, F., & Kaya, H. S. (2008). *Analyzing urban sprawl patterns through fractal geometry: The case of Istanbul metropolitan area* [Discussion Paper]. Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), University College London. <https://discovery.ucl.ac.uk/15200/>.
- Chen, Y. (2012). Fractal dimension evolution and spatial replacement dynamics of urban growth. *Chaos, Solitons & Fractals*, 45(2), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2011.10.007>.

- Jevric, M., & Romanovich, M. (2016). Fractal dimensions of urban border as a criterion for space management. *Procedia Engineering*, 165, 1478–1482. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.882>.
- Nie, Q., Xu, J., & Liu, Z. (2015). Fractal and multifractal characteristic of spatial pattern of urban impervious surfaces. *Earth Science Informatics*, 8(2), 381–392. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0159-1>.
- Tannier, C., Vuidel, G., Houot, H., & Frankhauser, P. (2012). Spatial accessibility to amenities in fractal and nonfractal urban patterns. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 39(5), 801–819. <https://doi.org/10.1068/b37132>.
- Wilson, A. (2000). *Complex spatial systems: The modelling foundations of urban and regional analysis* [eBook edition]. Pearson Education Limited.
- Turner, J. R., & Baker, R. M. (2019). Complexity theory: An overview with potential applications for the social sciences. *Systems*, 7(1), 4. <https://doi.org/10.3390/systems7010004>.
- Ostwald, M. J. (2009). *Fractal architecture: Knowledge formation within and between architecture and the sciences of complexity*. Saarbrücken : VDM Verlag Dr. Müller.
- Bovill, C. (1996). *Fractal geometry in architecture and design* (1st ed.) [E-book]. Boston, MA: Birkhäuser.
- Lorenz, W. E. (2003). *Fractals and fractal architecture* [Thèse de doctorat, Faculté d'architecture et d'aménagement de l'espace, Université technique de Vienne]. <https://doi.org/10.13140/2.1.3850.9606>.
- Harris, J. (2012). *Fractal architecture: Organic design philosophy in theory and practice* (Ebook ed.). University of New Mexico Press.
- Ostwald, M. J. (2001). "Fractal Architecture": Late twentieth century connections between architecture and fractal geometry. *Nexus Network Journal*, 3(1), 73–84. <https://doi.org/10.1007/s00004-000-0006-1>.
- Cooper, J., & Oskrochi, R. (2008). Fractal analysis of street vistas: A potential tool for assessing levels of visual variety in everyday street scenes. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(2), 349–363. <https://doi.org/10.1068/b33081>.
- Stamps, A. E. (2002). Fractals, skylines, nature and beauty. *Landscape and Urban Planning*, 60(3), 163–184. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00054-3).
- Joye, Y. (2007). Fractal architecture could be good for you. *Nexus Network Journal*, 9(3), 311–320. <https://doi.org/10.1007/s00004-007-0045-y>.
- Jencks, C. (1997). *The architecture of the jumping universe* (2nd ed.) [eBook]. John Wiley & Sons.
- Rian, I. M., Park, J.-H., Ahn, H. U., & Chang, D. (2007). Fractal geometry as the synthesis of Hindu cosmology in Kandariya Mahadev temple, Khajuraho. *Building and Environment*, 42(12), 4093–4107. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.028>.
- Sala, N. (2006). Fractal geometry and architecture: Some interesting connections. *WIT Transactions on the Built Environment*, Vol. 86, 163–172. https://doi.org/10.2495/ARC060171.*
- Ostwald, M. J., et Vaughan, J. (2016). Introducing the box-counting method. In *The fractal dimension of architecture* (Vol. 1, pp. 39–66). Birkhäuser, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32426-5_3.
- Ben Hamouche, M. (2009). Can chaos theory explain complexity in urban fabric? Applications in traditional Muslim settlements. In K. Williams (Ed.), *Nexus network journal* (Vol. 11, No. 2). Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8976-5_6.

Ben Hamouche, M. (2011). Fractal geometry in Muslim cities: How succession law shaped morphology. *Nexus Network Journal*, 13(2), 235–251. <https://doi.org/10.1007/s00004-011-0062-8>.

Reza, E., et Dincyurek, O. (2016). The interpretation of vernacular architecture through fractal models: In the case of Iran, Masouleh village. In G. Amoroso (Ed.), *Handbook of research on visual computing and emerging geometrical design tools* (pp. 55–77). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0029-2.ch003>.

Abdelsalam, M., et Ibrahim, M. S. (2019). Fractal dimension of Islamic architecture: The case of the Mameluke madrasas: Al-Sultan Hassan Madrasa. *Gazi University Journal of Science*, 32(1). <http://dergipark.gov.tr/gujs/issue/43586/414947>.

Rezazade, H. (2022). Visual and structural analysis of fractal geometry in the Sheikh Lotfollah Mosque ornaments (Isfahan-Iran). *International Journal of Architecture and Urban Development*, 12(3), 45–56. <https://doi.org/10.30495/IJAUD.2021.16769>.

Patuano, A., et Lima, M. F. (2021). The fractal dimension of Islamic and Persian four-folding gardens. *Humanities and Social Sciences Communications*, 8, 86. <https://doi.org/10.1057/s41599-021-00766-1>.

Chapitre 7 : Modélisation de la morphogenèse urbaine par la théorie des réseaux, méthode de la complexité

« Penser en termes de réseaux, c'est reconnaître qu'il n'existe pas d'entités isolées, seulement des connexions. »
Fritjof Capra

« La ville n'est pas faite de ceci ou cela, mais des rapports entre les mesures de son espace et les événements de son passé. »
Italo Calvino

. Introduction

Comme présenté dans le chapitre 4, La ville islamique traditionnelle se caractérise par sa géométrie irrégulière et son organisation urbaine organique, et évolutive. Elle constitue un objet privilégié pour l'analyse des processus complexes de la morphogenèse urbaine. Loin d'être le fruit du hasard, sa forme résulte d'une genèse progressive, guidée par les dynamiques politiques, sociales, culturelles, économiques et spatiales propres à chaque contexte historique. Comprendre cette complexité morphologique exige donc une approche théorique et méthodologique capable de rendre compte de la logique des dynamiques et des interactions multiples et multi échelles entre les éléments constitutifs de l'espace urbain.

Dans cette perspective, la science de la complexité et particulièrement la théorie des réseaux, offre un cadre pertinent pour modéliser la ville islamique et ses processus de morphogenèse. En représentant les relations entre rues, intersections, quartiers et centres fonctionnels, les réseaux permettent de mettre en évidence les structures d'organisation sous-jacentes à l'apparente irrégularité du tissu urbain. Ces structures révèlent non seulement les logiques d'accessibilité et de hiérarchie implicites, mais aussi les propriétés émergentes telles que la centralité, la modularité ou l'efficacité des connexions, qui participent à la cohérence globale de la morphologie urbaine.

Ce chapitre propose d'explorer comment la modélisation de la morphogenèse urbaine, appliquée au cas des villes islamiques traditionnelles, peut être enrichie par les apports de la théorie des réseaux et de la science de la complexité. Il s'ouvre sur un premier point qui constitue un complément au chapitre 3 dans la réflexion épistémologique autour de la transition d'une conception spatiale de la ville vers une vision systémique et complexe. Le deuxième point présente les fondements de la morphogenèse urbaine en tant que processus d'émergence de la forme. Le troisième point expose la manière dont la théorie des réseaux permet de modéliser cette morphogenèse selon une approche dynamique et relationnelle. Le quatrième point s'attarde sur les réseaux spatiaux, en abordant leurs modalités de représentation ainsi que les mesures analytiques qui leur sont associées. Enfin, le cinquième et dernier point examine les méthodes et outils mobilisables pour extraire, construire et analyser les réseaux spatiaux, notamment à partir des systèmes d'information géographique (SIG).

1. La ville, du système urbain spatial au système complexe

Comme expliqué précédemment dans la section 1.3. du chapitre 3, nous avons défini ce qu'est un système et qu'est-ce qu'un système complexe aussi, en soulignant la distinction entre les deux. Le concept de système est apparu dans le champ scientifique au cours des années 1940, à travers une volonté d'étudier les éléments et leurs interactions selon une approche systémique.

Dans ce contexte, Bertalanffy (1968) explique : « *Au cours des deux dernières décennies, nous avons assisté à l'émergence du système comme concept-clé de la recherche scientifique. Bien sûr, les systèmes ont été étudiés depuis des siècles, mais quelque chose de nouveau a été ajouté.* ». Parallèlement, il existe différentes définitions du système, sans qu'aucune ne fasse l'objet d'un consensus universel. Cependant, Tirico (2020) confirme que le point de vue de Bertalanffy semble pertinent, car il met l'accent sur le fait qu'un système est un ensemble d'éléments en relation/interaction. Les éléments échangent, interagissent et se comportent en fonction d'un sous-ensemble du système. L'interaction est une sorte d'action qui se produit lorsque deux objets ou plus s'influencent mutuellement, établissant ainsi une relation sur une période donnée. Ainsi, Bertalanffy (1968) définit système comme un ensemble d'éléments en interrelation. L'interrelation signifie que les éléments p entretiennent des relations R , de sorte que le comportement d'un élément p dans R est différent de son comportement dans une autre relation R_0 . Si les comportements dans R et R_0 ne sont pas différents, il n'y a pas d'interaction et les éléments se comportent indépendamment par rapport aux relations R et R_0 .

Dans le prolongement de cette approche, Tirico (2020) souligne que comprendre comment les parties interagissent est la clé fondamentale pour saisir le comportement d'un système. En effet, dans certaines conditions, les parties s'organisent et le système manifeste des propriétés, des régularités, des formes et un ordre. Les éléments d'un système peuvent avoir des comportements et des propriétés similaires ou non à un moment donné. Dans ces cas, le système est composé de différents types d'éléments, avec des caractéristiques ou des comportements distincts, ce qui implique une manière différente d'affecter les autres éléments. Par ailleurs, tout système se distingue de son environnement. Selon Le Moigne (1974), l'environnement désigne l'ensemble des éléments extérieurs au système dont l'état peut être affecté par celui-ci, ou l'influencer en retour. De nombreux systèmes biologiques, naturels ou physiques, échangent en permanence de l'information, de l'énergie ou de la matière avec leur environnement. Pour les systèmes vivants, ces échanges constituent une condition de survie : par exemple, un embryon absorbe les nutriments contenus dans le liquide amniotique. Il est, en ce sens, difficile d'imaginer un système totalement fermé ; en d'autres termes, un système est rarement isolé de l'environnement dans lequel il se déploie.

1.1. Organisation, structure et interaction dans un système spatial

Selon Dauphiné (2003), le terme système intègre trois idées clés : la complexité, le rôle essentiel des interactions, et l'organisation. Aussi, Cambien (2007) confirme que la notion de système renvoie à un ensemble constitué d'éléments en interaction, dont le fonctionnement dépend de leurs connexions mutuelles. Ainsi, l'interaction désigne le lien dynamique entre les éléments, tandis que l'organisation reflète la manière dont ces éléments sont agencés au sein de l'ensemble pour former un tout cohérent. L'organisation ne se limite pas à une disposition statique : elle structure le système et conditionne son existence en tant qu'unité. Dans cette perspective, Morin (1986) affirme que l'organisation est une propriété essentielle du système : elle permet au système à la fois de se maintenir, se relier, se produire, et de produire ses propres composantes. Elle émerge des interactions entre les entités, assurant une forme d'ordre interne dans un environnement potentiellement désordonné. Autrement dit, l'organisation est ce qui rend possible l'autonomie du système, en générant l'ordre au sein du chaos environnant. Valéry

(1973) souligne quant à lui l'ambivalence du terme : l'organisation renvoie à la fois au processus d'organisation et à son résultat. Elle ne peut être dissociée du système, puisque l'un ne prend sens qu'en relation avec l'autre. En ce sens, la structure d'un système, c'est-à-dire l'organisation de ses parties, constitue son identité. Si cette organisation change profondément, le système perd son intégrité : il se transforme où se désintègre.

Concurremment, Maturana (1988) définit la structure comme l'ensemble des composants actuels d'un système, ainsi que les relations concrètes qui s'établissent entre eux, donnant ainsi lieu à une unité composite caractérisée par une organisation particulière. Il distingue ainsi la structure manifestation concrète et évolutive du système de son organisation, qui en garantit l'unité et l'identité. Dans cette lignée, Le Moigne (2006) affirme que la structure ne doit plus être considérée comme un invariant, encore moins comme une loi explicative du comportement du système. Elle représente la manière dont le système est effectivement constitué à un moment donné. Dès lors, un système n'existe que si son organisation est conservée : elle constitue le socle de son identité. La structure, plus statique que l'organisation, peut changer au fil du temps sans nécessairement altérer l'identité du système, tant que l'organisation demeure. En revanche, si l'organisation cesse d'être maintenue à travers ces transformations structurelles, le système se désintègre. La conservation de l'organisation apparaît ainsi comme la condition essentielle à la persistance d'un système dans le temps.

Il convient aussi de souligner les relations entre organisation, structure et temps dans le fonctionnement des systèmes. Des relations comme la cause et l'effet, ou l'interaction et l'émergence, peuvent être analysées selon leur position sur l'échelle temporelle. Lorsque la cause et l'effet appartiennent à la même échelle de temps, on parle de relation synchrone ; dans le cas contraire, la relation est dite diachronique. La première correspond généralement au niveau organisationnel, c'est-à-dire à la manière dont les éléments interagissent de façon immédiate entre eux et avec leur environnement. La seconde relève plutôt du domaine structurel, dans la mesure où elle traduit des transformations progressives du système (Nakajima, 2004). Dans le cas de la ville, cette distinction temporelle permet de mieux saisir la nature des dynamiques urbaines. Une ville est constituée d'une multitude d'individus qui interagissent quotidiennement : ils se déplacent, échangent, utilisent l'espace et tentent de satisfaire leurs besoins. Ces interactions synchrones traduisent le fonctionnement immédiat de la ville, où les actions individuelles s'articulent en un système d'organisation collective. Elles relèvent de ce que Pumain (2006b) identifie comme des dynamiques locales, caractéristiques des systèmes urbains. Toutefois, ces mêmes comportements, lorsqu'ils se répètent et s'accumulent sur la durée, influencent la structure physique de la ville. Ainsi, les pratiques de mobilité, d'habitat ou de consommation façonnent progressivement les réseaux de rues, la distribution des fonctions, ou encore la spécialisation des quartiers (Oliveira, 2016).

Pour comprendre ces dynamiques, organisationnelles ou structurelles, il est nécessaire de recourir à une démarche analytique. En effet, étudier un phénomène c'est construire une représentation d'une partie du monde qui éclaire notre compréhension. En effet, étudier un système en particulier, signifie collecter et encoder dans un formalisme toutes les informations importantes concernant ses éléments, leurs relations et leur environnement (Batty, 2007). La sélection de ces informations, ainsi que leur intégration pertinente, sont essentielles pour

produire des connaissances empiriques. Dans ce cadre, les informations spatiales jouent un rôle central : elles permettent de caractériser les systèmes dans leur dimension localisée (Schmitt, 2013). Les aspects spatiaux sont omniprésents dans de nombreux phénomènes humains et naturels, et constituent un pilier des études géographiques et urbanistiques, qui visent à expliquer la réalité en tenant compte de la disposition des objets, des phénomènes et des individus dans l'espace (Haggett, 1965).

Les approches récentes considèrent la ville comme un système spatial, composé d'éléments distribués dans l'espace et liés entre eux par des relations d'interdépendance, d'échange et de flux, qui participent à l'organisation et à la dynamique de l'ensemble urbain. (Lévy et Lussault, 2003). Dans la même logique, Banos (2013) confirme que définir la ville comme système spatial constitue une étape préalable à la compréhension de la ville comme système complexe, où les relations ne sont plus seulement spatiales mais aussi dynamiques, adaptatives, multi-scalaires et évolutives. Auparavant, Pumain (1997) décrit la ville comme un système spatial constitué d'éléments interconnectés dans l'espace, dont les interactions façonnent des formes organisées à différentes échelles urbaines. Dans une perspective plus classique, Haggett (1965) définit un système spatial comme un ensemble où la position géographique des éléments conditionne leurs interactions potentielles. Dans ce cadre, les relations avec l'espace euclidien sont définies par les coordonnées spatiales des entités. Chaque élément est ainsi localisé, et cette localisation peut évoluer dans le temps, modifiant les structures d'interaction et la dynamique du système. L'espace euclidien est formellement défini comme un espace vectoriel réel muni d'un produit scalaire, permettant de mesurer distances et angles entre objets (Strang, 2009).

1.2. La ville comme système spatial complexe

West (2017) assure que la majorité des théories urbaines sont qualitatives, construites à partir d'études de cas, de récits, et parfois à des intuitions. Cependant, Batty (2005) confirme que la ville a longtemps été étudiée comme un objet spatial mesurable, dont les formes, les fonctions et les dynamiques pouvaient être décrites, modélisées et prévues à partir de principes rationnels. L'étude quantitative en géographie et en études urbaines s'est d'abord appuyée sur des analogies avec la physique classique, mobilisant des concepts tels que la force, la masse ou l'énergie pour rendre compte des comportements urbains et des interactions spatiales. Cette approche, largement influencée par l'économie spatiale et la géographie urbaine des années 1930 à 1960, a donné lieu à une série de modèles théoriques simplificateurs, cherchant à expliquer l'organisation de l'espace urbain à travers des schémas d'équilibre et d'optimisation. Ces modèles classiques, fondés sur des lois universelles et des principes de stabilité, proposent une lecture déterministe de la ville, ignorant sa dimension évolutive et adaptative (Frankhauser, 1994 ; Pumain, 1998).

Fusco (2018) identifie plusieurs modèles représentatifs de cette approche, parmi lesquels, on retrouve notamment la théorie des lieux centraux (Christaller, 1933), qui modélise la répartition spatiale des fonctions urbaines selon des principes d'équilibre économique ; la théorie gravitaire de l'accessibilité (Reilly, 1931), qui explique l'organisation des flux et des interactions spatiales par analogie avec l'attraction physique ; l'approche fonctionnaliste en architecture et urbanisme (Loos, 1908 ; Le Corbusier, 1925/1994), fondée sur la spécialisation des espaces selon leur usage ; ainsi que le zonage réglementaire (Le Corbusier, 1943 /1971), comme principe d'aménagement fondé sur une séparation rigide des fonctions urbaines. Ces

modèles classiques, bien qu'ils aient structuré durablement la pensée urbanistique, trouvaient leurs limites et étaient remise en cause à partir des années 1950-1960. Les travaux de Jacobs (1961) et de Alexander (1965) représentaient une avant-garde dans cette remise en question.

Assurément, Jacobs (1961) met en lumière l'auto-organisation des villes à travers les interactions sociales quotidiennes, soulignant que l'ordre urbain émerge de manière spontanée et progressive. En introduisant la notion de complexité organisée urbaine « *organized urban complexity* », elle compare la ville à un organisme vivant, composé de nombreuses fonctions interconnectées. Son approche qualitative marque une étape clé dans la reconnaissance des villes comme systèmes complexes, dont l'organisation résulte d'interactions internes et adaptatives. Dans la même vision, Alexander (1965), critique la vision hiérarchique de la ville issue de l'urbanisme fonctionnaliste, fondée sur des structures rigides et emboîtées. Il lui oppose une organisation en demi-treillis, plus fidèle à la complexité des villes autoorganisées. Aux côtés de Jacobs, il adopte une approche systémique et organiciste, considérant la ville comme un organisme vivant aux dynamiques imbriquées, plutôt qu'une machine planifiée selon des principes strictement rationnels (voir section 4, chapitre 3).

Également, Batty (2005 ; 2013) confirmait que l'idée de considérer les villes comme des systèmes émerge dans les années 1950 trouva ses racines avec l'application de la cybernétique (Wiener, 1948) et de la théorie générale des systèmes (Bertalanffy, 1968) et aux sciences sociales. Ces approches ont conduit à considérer les villes non plus comme de simples structures physiques, mais comme des systèmes organisés d'éléments interconnectés, dont le fonctionnement repose sur des boucles de rétroaction assurant à la fois leur stabilité et leur orientation vers des finalités définies. À partir des années 1980, un changement de paradigme s'opère : les villes sont désormais vues comme des systèmes complexes, organisés de manière décentralisée et émergente, loin de l'équilibre, sujets à des dynamiques non linéaires, imprévisibles et chaotiques. L'accent est mis sur l'émergence, et les changements discontinus. La science de la complexité réactualise la théorie des systèmes, en y intégrant les notions d'agents et de réseaux dynamiques. Des modèles multi-échelles permettent de simuler la croissance urbaine à partir du bas vers le haut « *bottom-up* », à travers des outils comme les automates cellulaires, les modèles multi-agents ou les modèles de réaction-diffusion et la géométrie fractale. Les villes sont donc comprises comme des structures autoorganisées, évolutives et fractales, où la morphologie physique reflète la complexité des interactions sociales et économiques, et où la modélisation vise à éclairer les actions privées et publiques.

Aussi, comme discuté dans la section 1 du chapitre 3, la complexité est polysémique, toutefois, Il existe néanmoins un consensus général sur le fait que certains systèmes se distinguent par les interactions décentralisées entre leurs multiples composantes. Dans un environnement donné, ces composantes sont fréquemment influencées par des facteurs exogènes et entretiennent avec leur milieu des échanges d'énergie, de matière et d'information. Ces dynamiques contribuent au fonctionnement du système et à son identité. La manière dont les parties sont en relation, l'effet des facteurs exogènes sur le système et les boucles de rétroaction produisent des effets complexes et l'émergence de propriétés inattendues. Ces principes généraux peuvent être observés dans les villes, et la théorie des systèmes complexes est devenue un cadre pour étudier et décrire les villes et les systèmes urbains. En effet Portugali (2000, 2012) souligne que la théorie de la complexité fournit un cadre complet pour étudier les dynamiques urbaines, elle peut établir des liens solides entre les disciplines urbaines qualitatives et quantitatives, en plus elle accorde une intention à la morphogenèse urbaine. La

ville, en tant que système complexe, ne se limite pas à une configuration spatiale figée, mais se transforme au fil du temps sous l'effet de dynamiques émergentes. C'est cette capacité à engendrer des formes à partir d'interactions multiples, ce que l'on désigne par morphogenèse (voir chapitres 2).

Les systèmes urbains peuvent être observés d'un point de vue économique, culturel, anthropologique ou technique. Les villes ne peuvent pas être réduites à une seule description taxonomique. Les dynamiques de ce type de système ne peuvent pas être réduites à ce qu'une seule discipline (Allen et Strathern, 2008). Dans ce contexte hétérogène et fragmenté, la théorie des systèmes complexes devient utile, en reliant différents domaines. Les villes ne sont pas un système compliqué, où un grand nombre d'éléments peuvent être décomposés, étudiés puis recomposés pour expliquer l'organisation (Fusco, 2018). Les villes sont complexes, car des comportements et des propriétés inattendus émergent d'un grand nombre d'éléments et de relations en interaction entre des sous-parties qui se chevauchent (Allen, 2005). Différentes parties des systèmes urbains sont interconnectées et, pour les comprendre, nous ne pouvons pas les étudier indépendamment. Les villes ne sont pas décomposables en sous-parties de plus en plus simples, qui peuvent être recomposées en une série d'ensembles interconnectés (Alexander, 1966, 1977).

1.3. Organisations dans les systèmes urbains complexes

Pour les systèmes urbains, Alexander et al. (1977) suggèrent l'existence de règles qui organisent les relations imbriquées entre les éléments constitutifs de l'espace. Aucune entité n'est autonome ni complète en elle-même ; chaque partie dépend des autres : une rue, par exemple, n'a de sens qu'en relation avec un lieu, et un lieu ne peut être compris indépendamment du réseau viaire auquel il appartient. Sur cette base, ils distinguent deux grands types d'organisation spatiale :

- L'organisation sociotechnique, qui concerne la distribution spatiale des populations et des activités. Elle se manifeste, par exemple, dans l'inégale répartition des logements sociaux, la concentration des activités commerciales le long des axes de fort transit, ou encore dans les phénomènes de ségrégation sociale.
- L'organisation physique du tissu urbain, qui renvoie à la disposition géométrique des éléments construits. Elle s'illustre notamment dans les phénomènes d'étalement urbain ou dans les modèles morphologiques décrivant les relations spatiales entre rues, îlots et bâti.

De manière générale, l'ordre dans les systèmes spatiaux émerge à travers des régularités dynamiques qui donnent lieu à des motifs spatiaux « *spatial patterns* » (formes, densités, symétries) exprimant une organisation structurée de l'espace (Batty, 2005). Ces motifs traduisent souvent une différenciation fonctionnelle, comme la division en zones d'activités (Boeing, 2019). Les relations entre certaines propriétés urbaines (telles que la densité ou l'intensité) et leurs dimensions géométriques (longueur, surface) suivent des lois non linéaires (Chen et Huang, 2018). Ces comportements, fréquemment décrits par des lois de puissance et des relations allométriques, révèlent une structure hiérarchique et multi-échelle propre aux

systèmes urbains (Frankhauser, 1994). En l'absence d'une échelle d'observation privilégiée, les motifs se reproduisent à différentes échelles, ce qui exclut toute métrique unique. Cette invariance d'échelle est notamment observable dans les empreintes bâties ou les réseaux viaires, illustrant ainsi la récurrence de ces motifs à travers les différents niveaux d'organisation spatiale (Salingaros, 2005).

Les systèmes spatiaux complexes désignent des systèmes dans lesquels les dimensions spatiales jouent un rôle central dans la définition des relations entre les éléments constitutifs et dans les échanges avec leur environnement (Wilson, 2024). La manière dont ces éléments s'organisent peut-être observée à travers la formation de motifs spatiaux, la répétition de certaines propriétés à différentes échelles, ainsi que l'inégale importance structurelle que revêtent certaines parties du système par rapport à l'ensemble (Boeing, 2018). L'organisation à invariance d'échelle décrit des configurations dans lesquelles la structure, les propriétés ou les dynamiques du système restent similaires lorsque l'on change d'échelle d'observation (Dauphiné, 2011). Autrement dit, une même propriété demeure valide quelle que soit l'échelle considérée, ce qui rend possible l'apparition de lois de puissance comme expressions mathématiques de cette invariance (West, 2017). Dans un système spatial, cette invariance d'échelle peut se manifester de différentes manières, notamment dans la façon dont le système occupe ou remplit l'espace. Elle se traduit fréquemment par des propriétés d'auto-similarité ou d'auto-affinité, observables dans certaines parties ou sous-structures du système. Ces caractéristiques sont propres aux formes fractales, que nous développons plus en détail dans le chapitre 6 (Batty et Longley 1994 ; Frankhauser, 1994).

2. Modélisation de la morphogenèse urbaine

Ainsi, considérer la ville comme un système spatial complexe, composé de sous-systèmes en interaction, permet d'intégrer ses dimensions dynamiques et multi-scalaires. Une telle approche offre la possibilité de dépasser les représentations statiques ou déterministes de la forme urbaine (Bretagnolle et al., 2006). Simultanément, saisir les principes de fonctionnement d'un tel système ne permet pas à lui seul d'en comprendre les mécanismes de transformation. Il devient alors essentiel d'explorer comment ces dynamiques peuvent être traduites en modèles, c'est-à-dire formalisées à travers des règles ou des lois susceptibles de simuler les processus d'émergence et d'évolution de la forme urbaine (Torrens, 2000). Cette démarche conduit à s'intéresser à la modélisation de la morphogenèse urbaine (Plazanet et Berger, 2008 ; Silva, 2010 ; Park 2010). Précédemment, cette notion fut définie dans le chapitre 2 comme le processus par lequel la forme de la ville résulte de l'interaction continue entre acteurs, contraintes spatiales et règles d'organisation. Elle se focalise sur les éléments structurels spatiaux (rues, parcelles) et les processus par lesquels elles émergent, évoluent et se transforment.

Les théories scientifiques ne se construisent pas d'un seul bloc mais émergent progressivement, à travers un processus itératif de confrontation aux faits, de reformulation des hypothèses, et de mobilisation de multiples points de vue (Dauphiné, 2003). Dans cette perspective, le rôle fondamental d'un modèle est précisément de fournir des réponses à ces interrogations. Les phénomènes, qu'ils soient naturels ou artificiels, peuvent être étudiés à

l'aide de modèles. L'efficacité d'un modèle à améliorer notre compréhension dépend de son évidence. Sa capacité à expliquer et à rendre un phénomène compréhensible n'est pas nécessairement liée à sa capacité à le reproduire (Le Moigne, 1990 ; Holland, 2023). Dans l'étude des systèmes complexes, un modèle peut bien reproduire un comportement observable, mais s'il n'est pas intelligible, il devient peu utile pour en comprendre les mécanismes sous-jacents (Portugali, 2012). Il est irréaliste, et souvent contre-productif, de tenter de résumer tous les aspects d'un système. Il convient plutôt d'en identifier les éléments essentiels, car un modèle ne représente toujours qu'une partie de la réalité. Le modélisateur sélectionne ces éléments en fonction des aspects du système qui l'intéressent, en cherchant à condenser dans un cadre rigoureux l'essentiel du phénomène étudié (Banos, 2013).

Un modèle est donc une simplification perfectible. Il doit être continuellement confronté à l'observation et à l'expérience pour être amélioré, de même que notre capacité à modéliser. Aussi, un modèle demeure toujours une conceptualisation de l'objet d'étude. (Frigg et Hartmann, 2020). Comme discuté en section 5 du chapitre 3, selon Mitchell (2009), un modèle est une représentation simplifiée d'un phénomène réel. Il sert d'outil pour comprendre et étudier la réalité, dans le champ scientifique il est à la fois représentation, explication et instrument de recherche. Il peut prendre différentes formes selon les objectifs visés :

- Mathématique, comme formule ou équation.
- Mécaniste, basé sur une explication causale.
- Conceptuel, outil de compréhension.
- Prédictif, comme outil de projection.
- Par Simulation, reproduction computationnelle de phénomènes complexes.

Le Moigne (2006) définit modélisation comme action d'élaboration et de construction intentionnelle, par composition de symboles, de modèles susceptibles de rendre intelligible un phénomène perçu complexe, et de renforcer le raisonnement de l'acteur qui projette une intervention délibérée dans le phénomène ; raisonnement visant notamment à anticiper les conséquences de ces projets d'actions possibles. La modélisation cherche à restituer les logiques d'organisation globale, les échanges, les structures spatiales et leur évolution temporelle (Timmermans, 2012). La modélisation des systèmes urbains fournit un cadre fonctionnel et systémique, tandis que la morphogenèse urbaine se concentre selon une approche dynamique sur les formes physiques résultantes. Ensemble, elles permettent de comprendre à la fois le comment (formes) et le pourquoi (fonctions, interactions) de l'évolution urbaine (Batty et Marshall, 2012). En tant que champ interdisciplinaire, la modélisation urbaine cherche à représenter, simuler et comprendre le fonctionnement des villes en tant que systèmes. Elle offre la possibilité d'analyser les dynamiques spatiales, d'identifier des régularités, de formuler des hypothèses explicatives, ou encore de tester des scénarios prospectifs dans une perspective d'aide à la décision (Gurr, 2014).

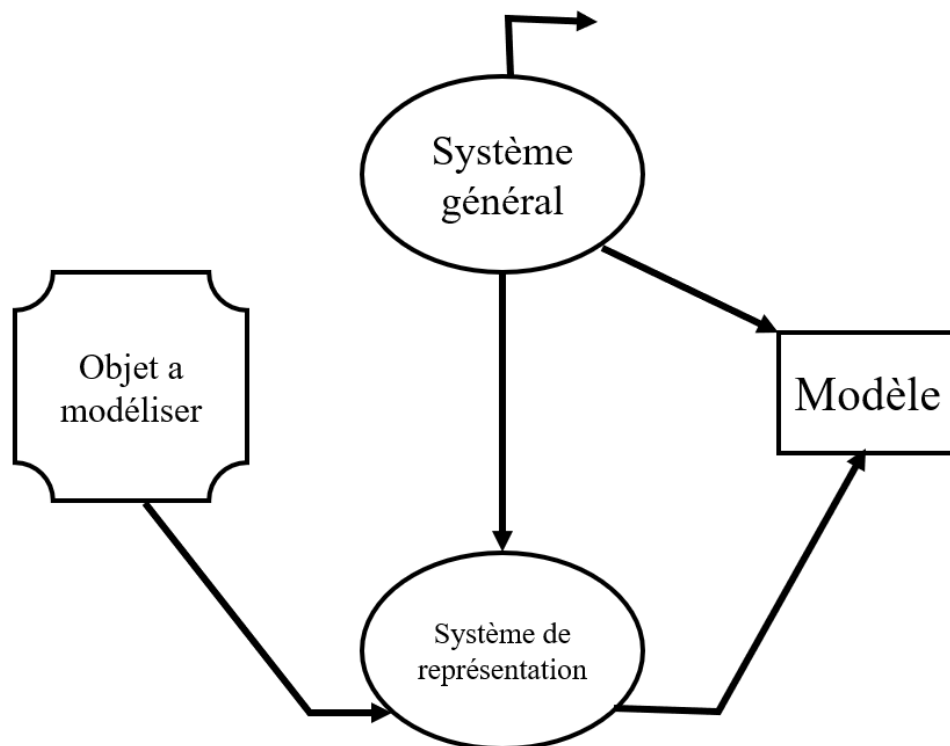


Figure 7.1. Abstraction schématique des étapes d'une modélisation selon Le Moigne. Source : auteur.

Douady (2014) confirme que modéliser la morphogenèse urbaine peut sembler difficile en raison de la complexité propre de la ville, entité vivante faite de flux, d'organismes, de couches historiques, d'acteurs multiples et de temporalités diverses. Toutefois, un modèle ne vise pas la reproduction exacte du réel, mais une représentation maigre qui simplifie pour mieux comprendre. Il cherche à isoler des mécanismes fondamentaux capables d'expliquer de nombreux phénomènes avec peu d'éléments. Un bon modèle urbain n'est pas un outil figé mais un instrument de compréhension, révélant les logiques profondes de la formation urbaine, et ouvrant la voie à de nouvelles réflexions interdisciplinaires sur la ville. Conjointement, Lesne et Bougine (2006) soulignent deux possible risques observant toute tentative de modéliser la morphogenèse des systèmes : le piège de l'analogie et celui de l'exhaustivité.

- Le problème de l'analogie réside dans le fait qu'un modèle peut parfaitement reproduire la forme ou les dynamiques apparentes d'un système, sans pour autant refléter ses mécanismes de formation réels. Ainsi, une similarité formelle ne garantit en rien une validité causale. C'est le cas, par exemple, des films d'animation où les objets évoluent selon des lois visuellement convaincantes mais totalement distinctes des lois physiques réelles. Un autre exemple célèbre est celui de la structure en bandes d'un embryon de drosophile : elle ressemble à une structure de Turing, produite par la diffusion couplée à des réactions chimiques, alors qu'en réalité, chaque bande est spécifiquement contrôlée par un ensemble unique de morphogènes. Le risque est donc de confondre ressemblance formelle et validité explicative, menant à des conclusions erronées.
- Le problème de l'exhaustivité, quant à lui, concerne l'erreur inverse : croire qu'un bon modèle doit intégrer un maximum d'informations sur le système. Or, l'efficacité d'un

modèle repose justement sur sa capacité à simplifier sans perdre l'essentiel. Trop de détails peuvent noyer les mécanismes fondamentaux, affaiblir la robustesse des résultats et favoriser la surinterprétation. Un bon modèle ne cherche pas à tout dire, mais à isoler les processus morphogénétiques clés, en démontrant qu'ils sont à la fois nécessaires et suffisants pour engendrer les formes observées. Ce caractère minimaliste mais explicatif permet de valider les hypothèses de départ par un accord qualitatif avec la réalité. Ce n'est que dans un second temps, à des fins de prédiction fine, qu'on pourra enrichir le modèle pour obtenir une meilleure précision quantitative.

Également, Fusco (2018) souligne que la difficulté à comprendre de nombreux systèmes et l'incapacité à décomposer les comportements en leurs mécanismes essentiels avaient imposé un changement épistémologique. La difficulté ne réside pas seulement dans la formalisation du système. Elle se situe également dans l'approche scientifique : pour appréhender la complexité, nous devons passer d'une approche qui évite l'ambiguïté, la contradiction et les inexactitudes, à une approche qui intègre l'incertitude, et le flou. De l'approche analytique qui vise à contrôler complètement les phénomènes, en mesurant tous les aspects et en les réduisant à quelques parties fondamentales à l'approche systémique qui repose sur l'incapacité à comprendre le système comme la somme des informations. De même, selon Dauphiné (2003) et Morin (2005), pour comprendre la complexité, nous devons remplacer :

- Le principe de réduction qui consiste à connaître les éléments à partir de la seule connaissance de leurs caractéristiques par le principe de distinction qui conçoit la relation entre le tout et les éléments.
- Le principe de disjonction qui consiste à isoler et à séparer les disciplines par le principe de conjonction qui surmonte l'hermétisme des domaines cognitifs, en intégrant les connaissances.
- Le principe déterministe par un principe qui intègre l'incertitude, l'incapacité à tout prédire et les difficultés à valider les relations cause-effet entre les micro-relations et les macro-propriétés.

Dans la même vision, Donnadieu et Karsky (2002) confirment que l'approche systémique est une manière d'entrer dans la complexité. Selon Le Moigne (1990) et Morin (2005), l'approche systémique n'abandonne pas les principes fondamentaux de la science ; rompant avec une partie de la méthode scientifique de Descartes, elle propose qu'un système doit être mieux compris dans un contexte global, plutôt qu'isolément. Elle peut être décomposée en trois étapes :

- **Investiguer la réalité**, concerne l'observation et la description des principaux aspects du système (propriétés et dynamiques).
- **Modéliser le système**, concerne l'encodage opératoire dans un formalisme rigoureux de toutes les informations qui peuvent être utiles pour répondre à la question posée.
- **Simuler l'évolution**, concerne l'étude de l'évolution du modèle au cours du temps.

Le résultat de ces étapes peut être vu comme une collection d'informations utiles pour améliorer la compréhension du système étudié. Pour enrichir cette compréhension, l'étude du système doit être pensée comme une « boucle » : observer la réalité, en extraire les éléments et mécanismes fondamentaux, construire un modèle, en simuler l'évolution, comparer les résultats avec les données réelles, ajuster le modèle si nécessaire, et recommencer. Initialement, Donnadiou et Karsky (2002) et Le Moigne (2006) suggèrent de considérer la première étape de l'approche systémique « investiguer la réalité » comme une « triangulation systémique », intégrant l'analyse conjointement de trois dimensions : la structure, la fonction et la dynamique du système :

- **L'aspect structurel**, concerne la manière dont le système est composé : ses propriétés essentielles, le réseau d'interactions, l'arrangement des éléments, la configuration du système.
- **L'aspect fonctionnel**, relatif à ce que fait le système et à son rôle dans l'environnement.
- **L'aspect dynamique**, concerne la nature évolutive du système, les processus de formation et d'évolution du système.

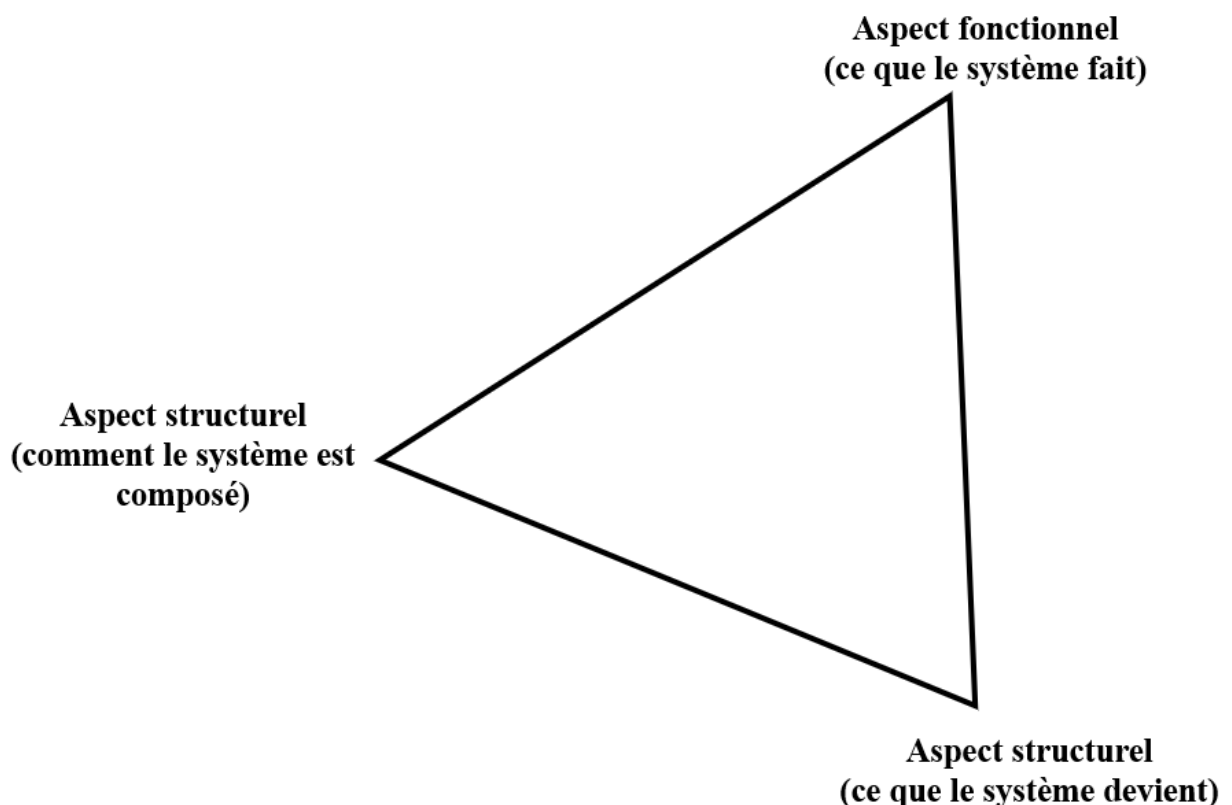


Figure 7.2. Schéma de la triangulation systémique selon Le Moigne. Source : auteur.

Ainsi, un modèle de système complexe peut être élaboré dans plusieurs objectifs : étudier l'évolution du système, comprendre ses mécanismes internes, décrire le plus clairement possible les interactions entre ses composantes, ou encore analyser les relations de causalité entre les événements (Mitchell, 2009). En ce sens, le modèle constitue une représentation

structurée du système, tandis que la simulation en est la mise en dynamique. La simulation est en effet une reproduction temporelle des mécanismes évolutifs d'un système, rendue possible par l'existence d'un modèle sous-jacent (Le Moigne, 1990). Pour que cette simulation prenne en compte l'évolution dans le temps, il est nécessaire de spécifier le cadre temporel de la modélisation. Celui-ci peut être continu, lorsque le système est observé à tout instant possible, ou discret, lorsqu'il évolue par étapes successives dans une séquence temporelle ordonnée (Benenson et Torrens, 2004). Ce cadre conceptuel trouve une application particulièrement pertinente dans l'étude de la morphogenèse urbaine, qui peut être abordée à travers les modèles issus de la théorie des systèmes complexes. Ces derniers permettent de dépasser les approches statiques ou strictement hiérarchiques, en intégrant les interactions multi-échelles, la production dynamique de l'espace, les structures fractales, ainsi que la contraction spatio-temporelle des territoires (Wohl, 2020). Ils offrent ainsi un cadre plus réaliste pour simuler et comprendre la formation des objets géographiques et urbains. Dans cette perspective, modéliser efficacement la morphogenèse des systèmes complexes implique de choisir un niveau d'abstraction pertinent, capable de saisir les dynamiques structurantes sans les diluer dans une complexité excessive.

2.1. Échelles d'observation dans la modélisation des systèmes urbains complexes

Dans une logique systémique, Pumain (2006b) propose de considérer la ville comme un système complexe dont l'analyse peut se déployer à différents niveaux d'organisation. Chaque niveau correspond à un certain degré d'agrégation, définissant une échelle d'observation spécifique, qui permet de saisir la diversité des dynamiques spatiales et temporelles à l'œuvre dans la morphogenèse urbaine. Ainsi, les échelles d'observation sont :

- **Le niveau microscopique : les entités élémentaires**, à l'échelle la plus fine, l'analyse porte sur les composantes élémentaires du système urbain, telles que les individus, les ménages ou les unités fonctionnelles locales. Ce niveau permet de modéliser les comportements localisés et les interactions de proximité comme les déplacements, les choix d'implantation ou les flux, qui participent à l'émergence des formes urbaines. Il s'agit d'une approche ascendante (bottom-up), où les structures spatiales résultent des dynamiques non linéaires produites par les interactions locales.
- **Le niveau intermédiaire : la ville comme structure agrégée**, à un niveau d'agrégation plus élevé, la ville est perçue comme un tout structuré, composé de zones différenciées selon leur fonction, leur densité ou leur position dans l'espace urbain. Cette échelle permet d'étudier la production et l'organisation de l'espace urbain comme résultant de processus collectifs, traduisant des logiques d'aménagement, de hiérarchisation et de structuration spatiale. Elle permet également d'identifier les formes stables et les trajectoires d'évolution à l'échelle de l'ensemble urbain.
- **Le niveau macroscopique : le système des villes**, à l'échelle la plus agrégée, l'analyse se déplace vers les relations entre les villes considérées comme éléments d'un système territorial global. Cette perspective met en lumière les interactions interurbaines, échanges de population, de biens, de capitaux ou d'informations, et les processus de différenciation spatiale. La ville devient ici un nœud au sein d'un réseau dynamique, influencé par des transformations globales, telles que l'évolution des technologies de communication ou la mondialisation. Des modèles de simulation permettent de représenter ces dynamiques systémiques à travers l'évolution conjointe des villes et leurs interrelations.

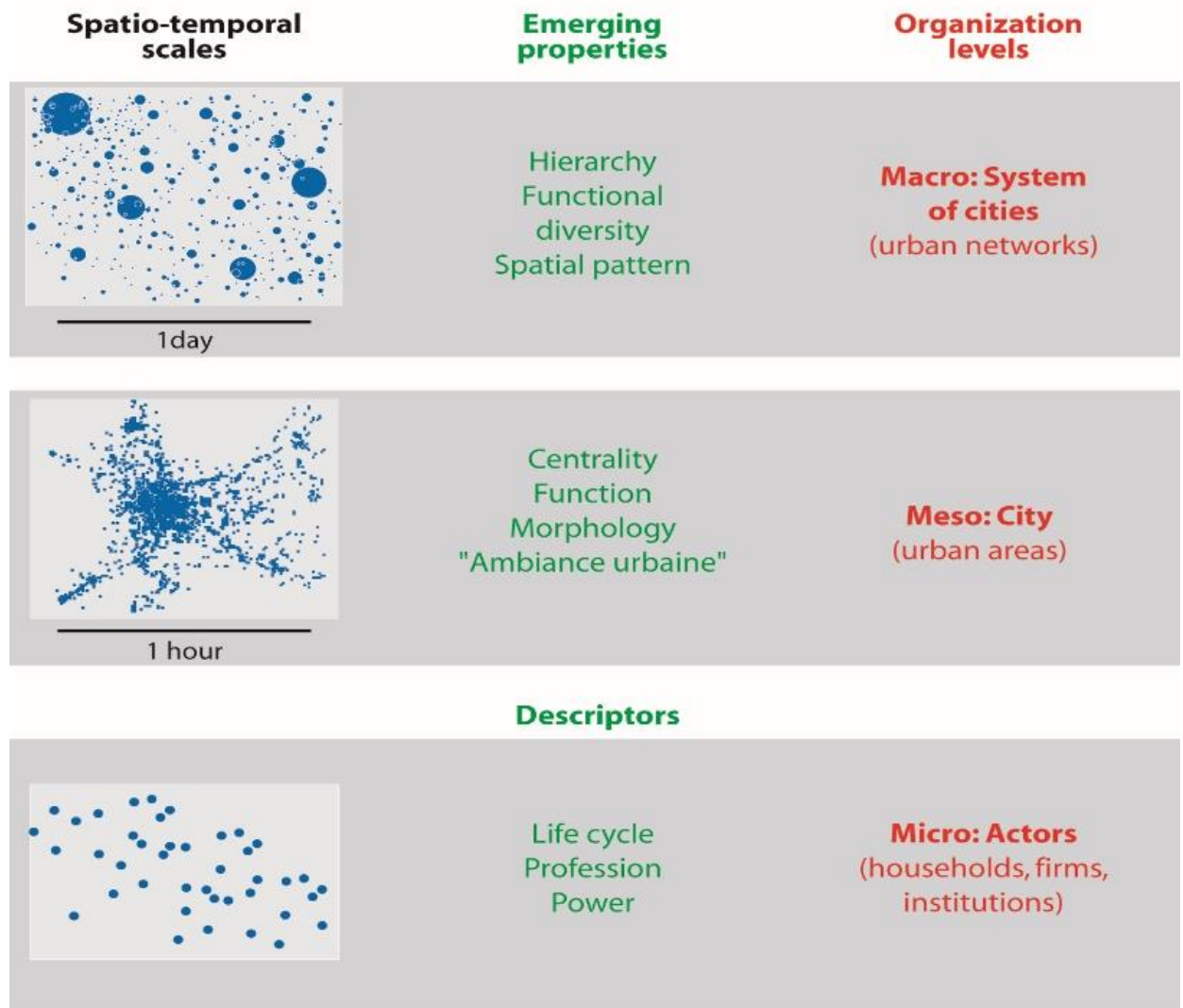


Figure 7.3. Echelles d'observation des systèmes urbains. Source : Pumain (2006b).

2.2. Dimension spatiale dans la modélisation de la morphogénèse urbaine

Comme mentionné précédemment, l'espace joue un rôle central dans le fonctionnement des systèmes complexes, notamment les systèmes urbains. Il est donc essentiel que tout modèle visant à représenter ces systèmes prenne en compte les informations spatiales. Aujourd'hui, de nombreux modèles spatiaux, aux objectifs et structures variés, sont disponibles. Les avancées en mathématiques, en science des systèmes complexes et en modélisation computationnelle ont permis une diversification et une amélioration significative de ces modèles (Batty, 2005). Benenson et Torrens (2004) affirment que dans le cadre de la modélisation des systèmes urbains, un formalisme doit intégrer trois dimensions fondamentales :

- **Localisation spatiale** : chaque entité du système (bâtiment, rue, parcelle, etc.) est associée à une position précise dans l'espace, généralement définie par un ensemble de coordonnées $(x_1, \dots, x_d)$, dans un espace euclidien ($\mathbb{R}^1$, $\mathbb{R}^2$ ou $\mathbb{R}^3$). Cette localisation permet d'ancrer les éléments dans leur contexte géographique.

- **Voisinage spatial** : dans les systèmes spatiaux, les interactions ont généralement lieu entre entités proches. Le voisinage est souvent défini à partir d'une distance métrique, qui permet d'identifier les relations de proximité, tant topologiques que géométriques.
- **Interactions spatiales** : les relations entre éléments dépendent de leur proximité dans l'espace, mais aussi de leur organisation spatiale. Par exemple, les interactions peuvent être influencées par la structure du réseau viaire, la densité bâtie, ou l'agencement des parcelles. L'espace n'est donc pas un simple cadre passif, mais un facteur actif qui façonne les dynamiques d'interaction et les processus morphogénétiques.

3. Modélisation de la morphogenèse urbaine par la théorie des réseaux

Après avoir posé les fondements théoriques et épistémologiques de la modélisation des systèmes urbains comme systèmes spatiaux complexes, il devient nécessaire d'explorer les outils formels capables de représenter les processus de morphogenèse urbaine. Parmi eux comme présenté dans la section 5 du chapitre 3, la théorie des réseaux émerge comme une méthode privilégiée des sciences de la complexité, articulant rigueur mathématique, capacité de représentation multi-échelle et puissance explicative des formes urbaines (Mazzocchi, 2018). Elle est également appliquée à la modélisation de la morphogenèse urbaine (El Gouj et al., 2022). Selon Neal (2013), les réseaux représentent une vaste gamme de systèmes naturels et artificiels ; ils sont composés de nœuds en relation par des liens et capturent l'organisation du système, y compris celle des systèmes urbains. Il distingue trois niveaux d'analyse des réseaux urbains :

- **Micro**, concerne les réseaux sociaux interpersonnels qui façonnent le quotidien urbain (amitiés, voisinage, solidarité...).
- **Méso**, concerne les réseaux spatiaux et institutionnels internes à la ville (transport, services, organisations...).
- **Macro**, concerne les réseaux entre villes (flux économiques, connectivité aérienne, mondialisation...).

Les réseaux constituent une représentation simplifiée du territoire, réduisant l'espace à une trame de points reliés par des lignes. Cette modélisation graphique, à la fois claire et opératoire, permet d'aborder la complexité sous forme discrète, en sélectionnant certains éléments jugés pertinents pour l'action ou l'analyse (Dupuy, 1991). Neal (2013) insiste sur la nécessité de considérer les réseaux comme des structures réelles, mesurables, et non comme de simples métaphores. La théorie des réseaux conçoit ainsi la ville comme un ensemble structuré de relations. Il s'agit d'étudier les « *patterns* » observables de connexions entre individus, institutions, espaces et villes, afin de révéler des dynamiques souvent invisibles dans les approches classiques. La théorie des réseaux ne se limite pas à une méthode quantitative ; elle constitue à la fois un cadre théorique et une méthodologie. Dans la même perspective, Boeing (2017a) confirme qu'en représentant la ville sous la forme d'un graphe d'interactions entre entités spatiales, cela permet d'identifier les régularités structurelles ainsi que les logiques

d'organisation sous-jacentes. Par ailleurs, sa compatibilité avec les modèles fractals lui permet d'articuler les dynamiques locales et globales au sein d'un processus multi-échelle. Au-delà de sa fonction descriptive, la théorie des réseaux s'impose comme une méthode explicative, reliant structure, dynamique et émergence dans l'étude des systèmes urbains en transformation.

3.1. Origine, évolution, et application de la théorie des réseaux

Le terme théorie des réseaux « *Network theory* » est utilisé, notamment dans les références scientifiques anglophones, comme synonyme du terme science des réseaux « *Network science* », pour désigner de manière générale l'ensemble des travaux portant sur les réseaux (Newman, 2010 ; Barabási, 2016). Dans cette acception large, il renvoie à un champ interdisciplinaire d'étude des structures et dynamiques des systèmes représentés sous forme de réseaux. Lagesse (2015) définit la science des réseaux comme approche interdisciplinaire qui utilise les concepts de la théorie des graphes pour étudier des systèmes réels composés d'entités en interaction. Elle s'est développée au XXe et XXIe siècles dans de nombreux domaines : sociologie (réseaux sociaux), biologie (réseaux de gènes, de neurones), informatique (internet), urbanisme (réseaux viaires), physique (réseaux complexes). Cependant, différents chercheurs tel que Mitchell (2009), Newman (2010), et Barabási (2016) insistent sur une distinction qui tend à s'imposer dans la littérature scientifique contemporaine : la théorie des réseaux désigne principalement l'étude mathématique des graphes issue de la théorie des graphes mobilisant des concepts comme la centralité, la connectivité ou les distributions de degré, tandis que la science des réseaux désigne un domaine interdisciplinaire plus vaste, intégrant des approches empiriques, computationnelles et dynamiques pour comprendre les propriétés émergentes des réseaux réels.

Selon Beoing (2017) et Marshall et al. (2018), la théorie des réseaux s'appuie sur la théorie des graphes, une branche des mathématiques discrètes. Fondamentalement, un graphe est une abstraction mathématique, une représentation formelle constituée d'un ensemble de nœuds (ou sommets) reliés par des liens (ou arêtes), lesquels peuvent être orientés ou non, pondérés ou non, et posséder différentes propriétés structurelles. Par ailleurs, Tirico (2020) précise qu'un réseau peut être perçu comme une structure proche de la réalité, le graphe en est la traduction mathématique, modélisant des entités et les relations qui les relient. La théorie des graphes, en tant que branche fondamentale des mathématiques, en étudie les aspects théoriques. Dans un graphe (ou réseau), les arêtes (liens) connectent les sommets (nœuds), et ce formalisme permet de synthétiser les informations essentielles d'un système tout en mettant en évidence, de manière quantitative, ses caractéristiques structurelles. C'est pourquoi la théorie des graphes a été largement mobilisée par les scientifiques pour représenter, analyser et simuler une grande variété de systèmes.

Sayama (2015) affirme que la science des réseaux a connu un développement rapide au cours des vingt dernières années, en grande partie grâce aux avancées de la physique statistique et à l'approche systémique issue de la science des systèmes complexes. L'émergence, à la fin des années 1990, des concepts de réseaux « *small world* » et « *scale-free* » a marqué un tournant décisif, positionnant la science des réseaux comme une composante essentielle des sciences de la complexité. Mitchell (2009) souligne qu'auparavant, les réseaux étaient étudiés de manière

isolée dans différentes disciplines, jusqu'à ce que l'élaboration de principes communs, à la même période, permette de fédérer ces approches. Cette nouvelle science s'appuie sur la puissance de calcul moderne et sur la disponibilité massive de données pour explorer les propriétés structurelles communes à des réseaux aussi variés que les réseaux sociaux, les connexions neuronales, Internet ou les routes aériennes. Fondamentalement interdisciplinaire, elle s'est constituée à la croisée de plusieurs domaines : la théorie des graphes, la physique des systèmes collectifs, l'analyse des réseaux sociaux et les systèmes dynamiques et s'est appliquée à une grande diversité de champs (Barabási, 2016). Parallèlement, dans le domaine des études urbaines, les réseaux apparaissent comme une structure fondamentale des dynamiques spatiales, des interactions humaines, des flux et de la morphologie urbaine (Batty, 2013).

La naissance de la théorie des graphes remonte à 1736, lorsque le mathématicien Léonard Euler s'attaque au célèbre problème des sept ponts de Königsberg. Ce problème consistait à déterminer s'il était possible de parcourir la ville en traversant chacun de ses ponts une seule fois, tout en revenant au point de départ. Pour le résoudre, Euler modélise la situation sous forme d'un graphe abstrait : les berges du fleuve Pregel sont représentées par des nœuds et les ponts par des liens reliant ces sommets (voir figure 7.4). Il simplifie ainsi la réalité en se concentrant uniquement sur les relations de connexions entre les différentes parties de la ville, ignorant les détails géométriques superflus (Lagesse, 2015). Grâce à cette représentation, Euler constate que la possibilité d'un tel parcours, que l'on appellera plus tard chemin eulérien, dépend du degré de chaque sommet, c'est-à-dire du nombre d'arêtes qui y sont incidentes. Il démontre rigoureusement qu'un tel chemin ne peut exister que si aucun sommet ou exactement deux sommets ont un degré impair. Or, dans le cas du graphe représentant Königsberg, quatre sommets présentent un degré impair. Il conclut donc qu'il est impossible de réaliser le parcours demandé. Cette démonstration marque la première application formelle d'un raisonnement abstrait pour résoudre un problème concret par la représentation en graphe, posant ainsi les bases de la théorie des graphes (Neil, 2016).

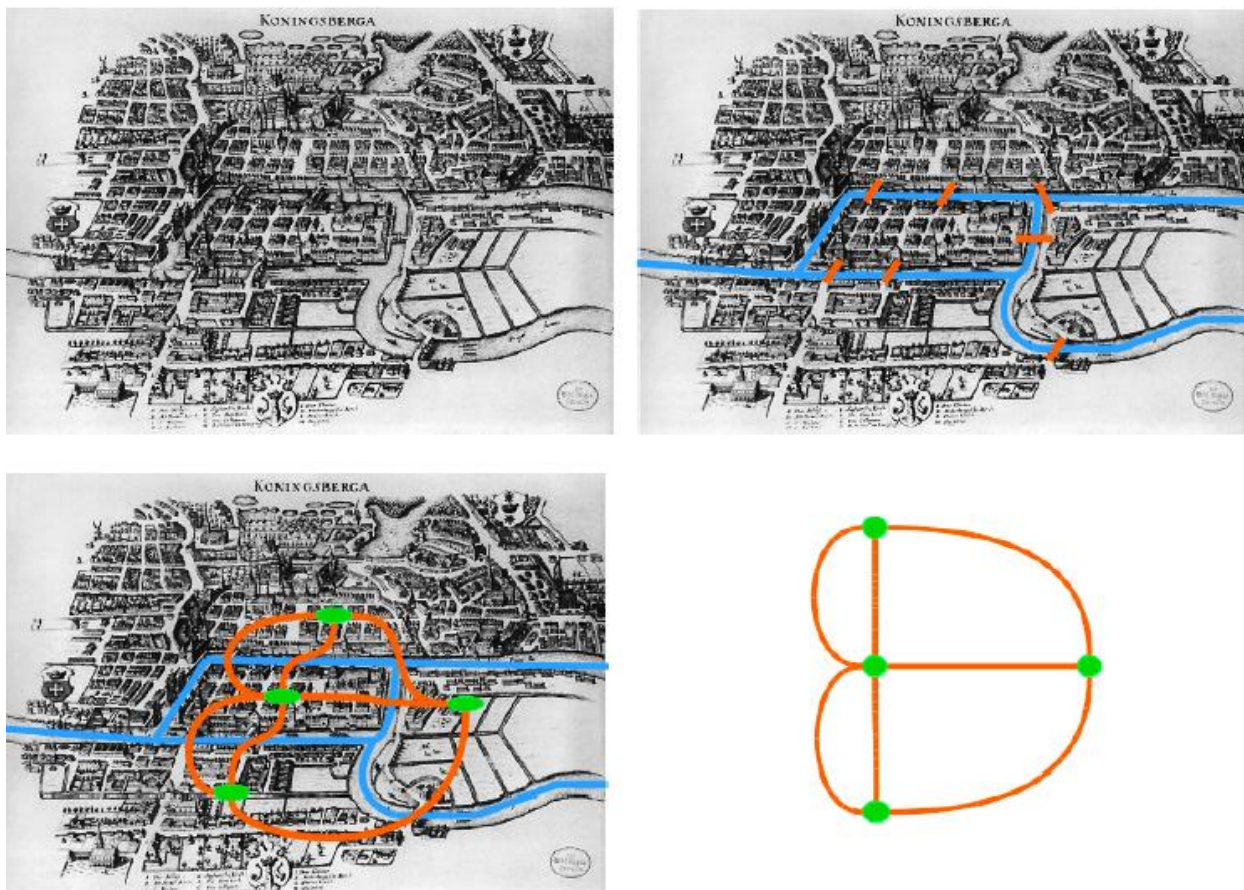


Figure 7.4. Abstraction topologique des ponts de Königsberg. Source : Lagesse (2015).

Lagesse (2015) confirme que la théorie des graphes, initiée par Euler au XVIII^e siècle et enrichie au XIX^e siècle par l'introduction du chemin hamiltonien, constitue une formalisation fondamentale pour la modélisation des systèmes. En ramenant un système à des nœuds reliés par des liens, elle propose un cadre d'analyse abstrait mais applicable à une grande diversité de domaines. Dès le début du XX^e siècle, cette approche est adoptée par les sciences sociales pour modéliser les interactions humaines, qu'elles soient sociales, professionnelles ou familiales. Les graphes permettent aussi d'étudier les réseaux de citations scientifiques ou les flux d'information. Avec l'avènement de l'informatique à la fin du XX^e siècle, l'analyse de graphes à grande échelle devient possible, révélant des propriétés structurelles telles que la centralité, la connectivité ou la résilience, et donnant lieu à la création d'algorithmes capables d'identifier des motifs et des structures émergentes. Les domaines d'application se multiplient : réseaux technologiques (énergie, communication, transport), mais aussi, au XXI^e siècle, systèmes biologiques, allant des réseaux métaboliques aux réseaux neuronaux. Devenue une véritable science des réseaux, cette approche interdisciplinaire permet aujourd'hui d'explorer les dynamiques complexes à l'œuvre dans une grande variété de systèmes, en intégrant non seulement leur structure topologique, mais aussi leur dimension spatiale et morphologique.

3.2. Types de réseaux

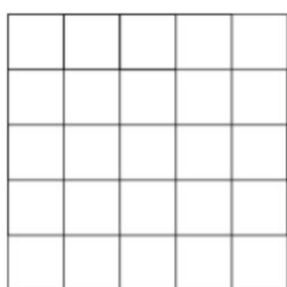
La diversité des réseaux observables dans les différents systèmes, qu'ils soient naturels, sociaux, urbains ou technologiques, nécessite une classification permettant d'identifier leurs

structures, leurs fonctions et leurs dynamiques. Cette typologie vise à organiser et à comparer les multiples formes que peuvent prendre les réseaux selon des critères à la fois structurels, fonctionnels et analytiques. En effet, un réseau peut être défini par la nature de ses connexions, la dynamique de son évolution, la diversité de ses entités ou encore la finalité de son usage dans un cadre d'analyse. En se basant sur différentes références, principalement Newman (2010) et Barabási (2016), le tableau n° présente un résumé de la typologie des réseaux fondée sur sept dimensions : la nature des liens (direction et poids), la structure spatiale (ancrée ou abstraite), la temporalité (statique ou dynamique), le niveau de complexité (aléatoire, petit monde, sans échelle, fractal, hiérarchique), le type d'entités représentées (sociaux, urbains, biologiques), la structure en couches (mono-, multi- ou multiplexe), et enfin la nature des nœuds (homogènes, hétérogènes, bipartis).

Tableau 7.1. Synthèse des types de réseaux et de leurs dimensions d'analyse. Source : Barabási (2016).

Dimension de classification	Types de réseaux	Caractéristiques principales
1. Nature des liens	Orienté / Non orienté	Avec ou sans direction des liens
	Pondéré / Non pondéré	Avec ou sans intensité, fréquence ou coût
2. Structure spatiale	Spatial	Nœuds et liens ancrés géographiquement
	Topologique	Connexions sans référence à l'espace
3. Temporalité	Statique	Structure figée à un moment donné
	Dynamique / Temporel	Évolution des nœuds ou des liens dans le temps
4. Complexité et organisation	Aléatoire	Connexions distribuées de manière uniforme
	Petit monde	Forte localité et faible distance moyenne
	Sans échelle	Distribution des connexions selon une loi de puissance
	Fractal	Autosimilarité structurelle à différentes échelles
	Hiérarchique	Organisation modulaire ou emboîtée
5. Nature des entités	Social	Nœuds représentant individus ; liens représentant relations sociales
	Transport	Espaces connectés par routes, rails...

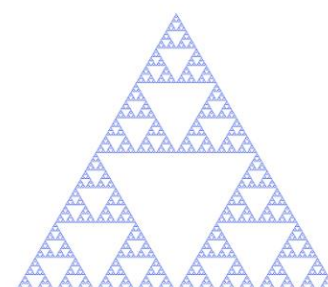
	Biologique	Nœuds représentant gènes, protéines ; liens représentant interactions biologiques
	Urbain	Espaces urbains reliés par rues ou flux
	Connaissances	Concepts liés par citations ou relations sémantiques
6. Structure en couches	Monocouche	Un seul type de relation
	Multicouche	Plusieurs types de relations
	Multiplexe	Superposition de relations entre les mêmes nœuds
7. Nature des nœuds	Homogène	Nœuds de même type
	Hétérogène	Nœuds de différents types
	Biparti	Deux types de nœuds, reliés uniquement entre types différents



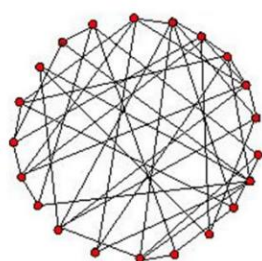
Regular lattice



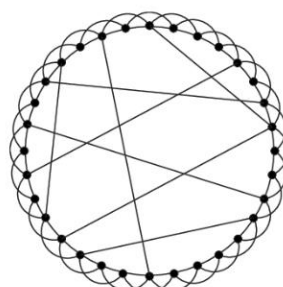
Bethe lattice



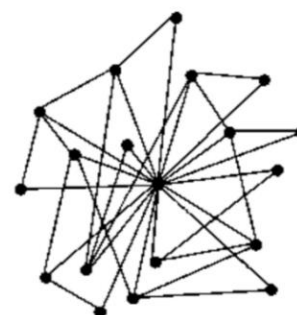
Fractal



Random network



WS smallworld



BA scale free

Figure 7.5. Représentation schématique des types de réseaux. Source : <https://physics.stackexchange.com/questions/1862/which-areas-in-physics-overlap-with-those-of-social-network-theory-for-the-analy>, consulté en Novembre 2024.

Dans le prolongement de notre analyse de la morphogenèse urbaine, envisagée sous l'angle des théories de la complexité et de la structure du réseau viaire, nous proposons de

distinguer trois grandes catégories de réseaux. Cette typologie vise à clarifier les différentes logiques d'organisation et de transformation qui sous-tendent les processus de morphogenèse urbaine. Il s'agit, d'une part, des réseaux dynamiques, qui traduisent l'évolution temporelle des interactions entre les entités ; d'autre part, des réseaux complexes, qui rendent compte de l'émergence de structures globales à partir d'interactions locales non linéaires ; enfin, des réseaux spatiaux, qui inscrivent ces dynamiques dans une géographie concrète, en articulant métrique, topologie et morphologie urbaine.

3.2.1. Réseaux dynamiques

La capacité à représenter un système sous forme de graphes prend une importance particulière lorsqu'on intègre la dimension temporelle. En effet, les systèmes se réorganisent au fil du temps. En raison des interactions entre leurs entités, leurs propriétés évoluent : le nombre de nœuds peut augmenter ou diminuer, et même la nature de leurs interactions peut changer (Holme, 2015). Plusieurs aspects permettent de caractériser la relation entre deux graphes à deux instants différents. Par exemple, on peut considérer un processus défini par l'ensemble des sommets. Dans de nombreux cas réels, les différents systèmes ne font pas que se transformer, ils croissent également (Tirico, 2020). Ainsi, Buhl et al. (2004) montrent que le nid de fourmis se compose d'un ensemble de galeries dont le nombre augmente avec le temps. Comme l'illustrent la figure 7.7, les fourmis creusent continuellement de nouvelles galeries, tandis que les galeries existantes ne sont pas détruites mais prolongées ou bifurquées. Le nid évolue alors comme un processus de croissance : sa forme s'étend, sans que ses parties antérieures ne disparaissent. Le graphe dynamique correspondant, qui rend compte de la morphogenèse du nid, est donc formé d'ensembles d'éléments croissants. Pour définir un graphe croissant, on ne considère pas nécessairement l'ensemble des arêtes : dans l'exemple du nid, une nouvelle galerie peut démarrer depuis le milieu d'une galerie existante. Dans une représentation graphique, cela implique que l'arête initiale est supprimée et remplacée par deux nouvelles arêtes. Ce type de croissance se retrouve également dans d'autres systèmes naturels ou urbains, tels que les réseaux de rues, les réseaux vasculaires, les nervures de feuilles ou encore les réseaux de fissures (Barthelemy, 2018).

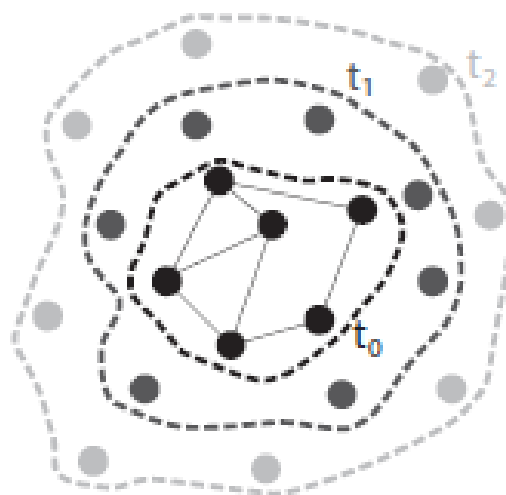


Figure 7.6. Evolution diachronique d'un réseau dynamique. Source : Tirico (2020).

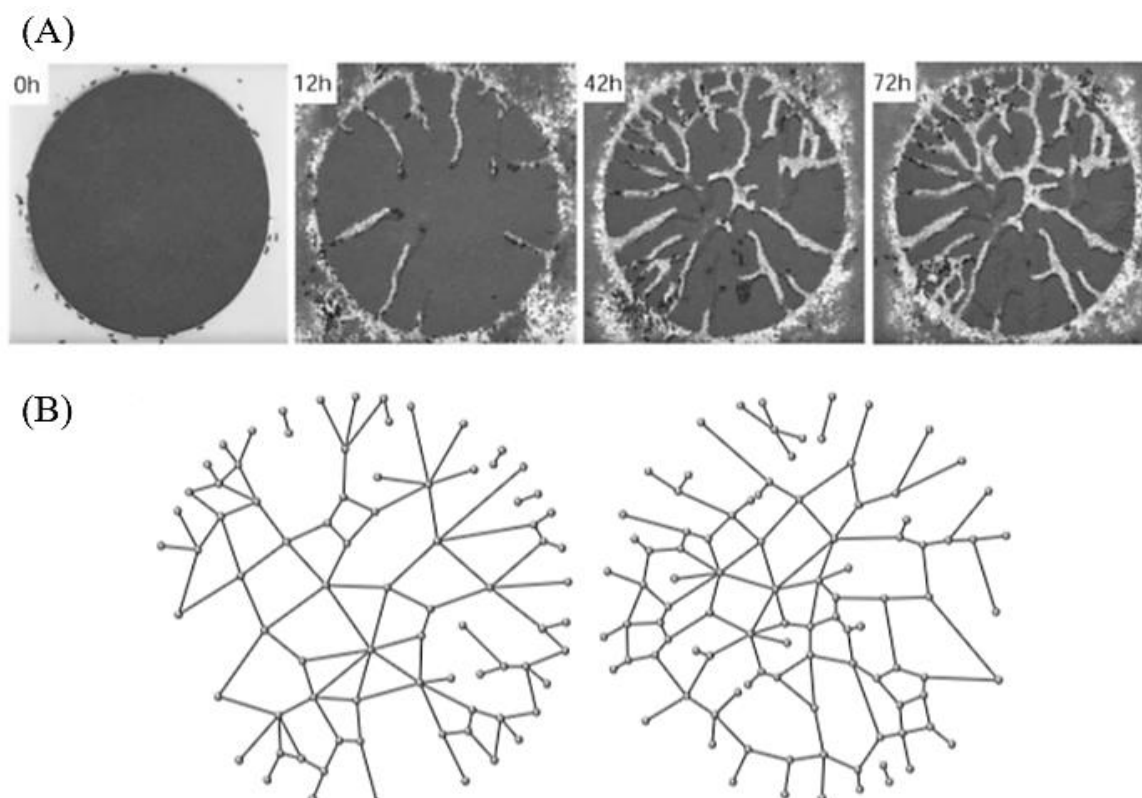


Figure 7.7 Réseau dynamique : (A) réseau de galeries produit par 200 fourmis sur 3 jours ; (B) La représentation sous forme de graphe de deux exemples de réseaux de galeries. Source : Buhl et al. (2004).

Paris evolving street network

4 Km



Physarum evolving vascular network

2 Cm

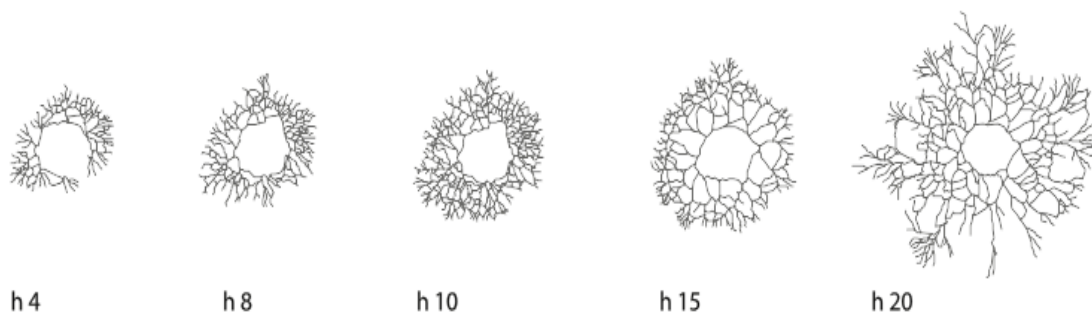


Figure 7.8. Dynamique du réseau viaire de Paris et de tissu vasculaire. Source : Barthelemy (2018).

3.2.2. Réseaux complexes

Mitchell (2009) confirme qu'une grande majorité des réseaux sont complexes, c'est-à-dire qu'ils sont composés d'une grande quantité de nœuds dont les interactions ne suivent pas de schémas simples ou évidents. Ils s'organisent dynamiquement, définissant des propriétés émergentes qui ne peuvent être détectées en étudiant chaque nœud indépendamment via les mesures classiques des graphes. En effet, au cours des deux dernières décennies, l'intérêt scientifique s'est progressivement déplacé de l'analyse des graphes simples, réguliers et abstraits vers l'étude de réseaux réels, souvent vastes, hétérogènes et dynamiques. Ce basculement a été largement poussé par la publication des travaux fondateurs, notamment ceux de Watts et Strogatz (1998) sur les réseaux petit monde « *small world* », puis de Barabási et Albert (1999) sur les réseaux invariants d'échelle « *scale-free* », qui ont ouvert la voie à une application plus empirique du formalisme des réseaux à l'examen des systèmes complexes du monde réel.

Watts et Strogatz (1998) ont montré qu'il existe un type de réseau situé entre les graphes réguliers, où chaque nœud a le même nombre de connexions, et les graphes aléatoires, où les liens sont créés au hasard. Ce type intermédiaire, appelé réseau de petit monde « *small world network* », combine les caractéristiques des deux extrêmes (voir figure 7.9). La plupart des connexions restent proches, ce qui forme des groupes bien reliés entre eux (fort *clustering*), mais quelques liens plus longs suffisent à connecter rapidement n'importe quel point du réseau à un autre. Ces réseaux ont donc à la fois une forte cohésion locale et une courte distance moyenne entre les nœuds, ce qui les rend efficaces pour transmettre l'information à moindre coût. On retrouve ce modèle dans de nombreux systèmes, comme les réseaux sociaux, les réseaux de neurones ou les réseaux électriques. Parallèlement, les réseaux invariants d'échelle « *scale-free networks* », développés par Barabási et Albert (1999), forment une autre catégorie importante de réseaux complexes. Eux aussi présentent la propriété de petit monde, mais leur structure est marquée par une distribution du degré suivant une loi de puissance. Cela signifie que la plupart des nœuds n'ont que peu de connexions, tandis qu'une minorité, appelés *hubs*, concentrent un très grand nombre de liens. Ces réseaux sont qualifiés de sans échelle, car il n'existe pas de degré moyen représentatif : on y trouve des nœuds avec tous les niveaux de connectivité. Cette structure se retrouve dans des systèmes variés comme le Web, les réseaux de citations scientifiques ou les réseaux métaboliques.

Dans la continuité, Jiang (2015 ; 2016) définit la ville comme un réseau complexe, en rupture avec les approches classiques fondées sur la géométrie euclidienne. Il mobilise notamment les deux sous-types de réseaux complexes : les « *small world networks* », et les « *scale-free networks* ». Ces concepts permettent d'éclairer la nature organique, émergente et adaptative des formes urbaines, envisagées comme des structures topologiques vivantes, hiérarchisées et autoorganisées, constituées de centres imbriqués à différentes échelles. La ville comme réseaux complexe se distingue par deux propriétés majeures : l'hétérogénéité, avec une majorité de petits éléments et une minorité de grands, et la dépendance spatiale, les éléments proches tendent à se ressembler, ce qui leur confère une cohérence à la fois locale et globale.

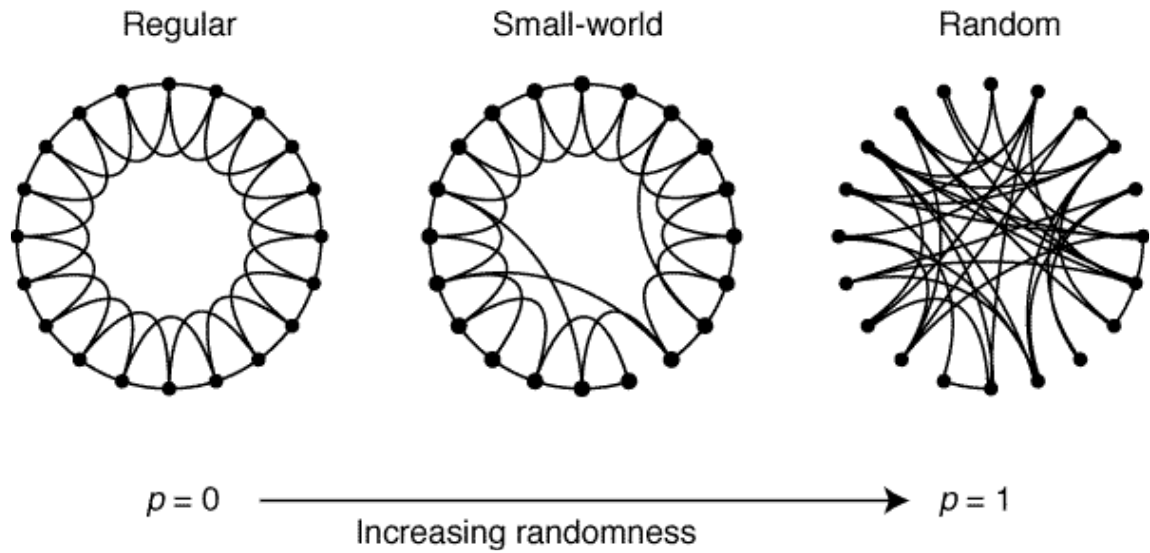


Figure 7.9. Transition d'un réseau régulier à un réseau aléatoire via un réseau petit monde. Source : Watts et Strogatz (1998).

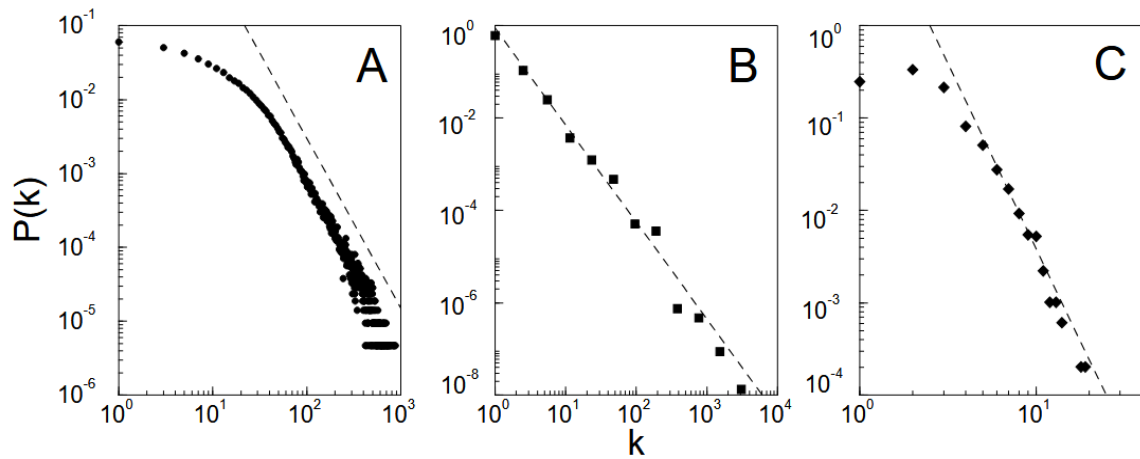


Figure 7.10. Distributions statistiques des indicateurs de connectivité. Source : Barabási et Albert (1999).

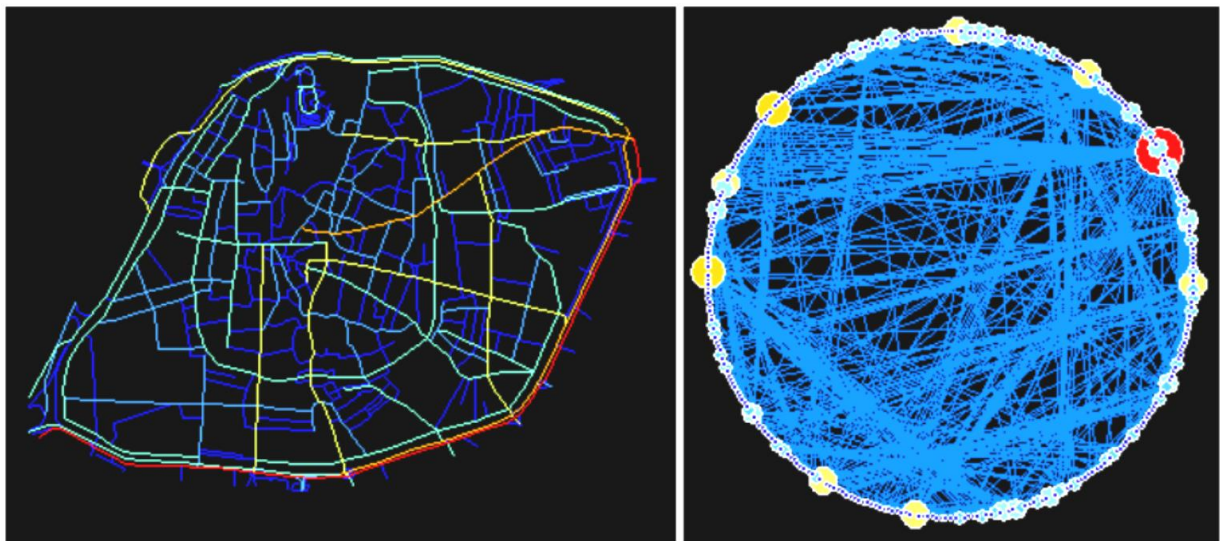


Figure 7.11. Hiérarchie du réseau viaire d'Avignon, et son graphe de connectivité. Source : Jiang (2015).

3.2.3. Réseaux spatiaux

De nombreuses applications des réseaux complexes se sont concentrées sur la caractérisation des aspects topologiques et temporels, tandis que les aspects spatiaux sont marginalement considérés ou négligés. Pour ces études, un réseau est la représentation d'un système abstrait, où la position des éléments n'est pas prise en compte et leurs interactions ne sont pas liées aux aspects spatiaux (Jiang, 2007). Contrairement aux réseaux abstraits, les réseaux spatiaux, tels que les réseaux viaires ou de transport, exigent une modélisation qui tienne compte de la géométrie, des distances et des contraintes physiques. Différents travaux comme Batty (2004), montrent que la prise en compte de la dimension spatiale permet une compréhension plus fine des dynamiques urbaines, des mobilités et de la morphogenèse. L'analyse des réseaux spatiaux offre ainsi une lecture plus réaliste et pertinente des structures urbaines, en intégrant l'ancrage géographique dans les modèles.

Principalement, Marshall et al. (2018) définissent les réseaux spatiaux comme des réseaux dont les éléments, nœuds et liens, sont ancrés dans l'espace géographique et possèdent des propriétés géométriques et topologiques essentielles à leur compréhension. Contrairement aux réseaux abstraits (réseaux sociaux ou neuronaux), les réseaux spatiaux représentent des entités physiques concrètes dont la forme, la position, la continuité et l'agencement dans l'espace sont déterminants. En effet, Agryzkov et al. (2017) définissent les réseaux spatiaux comme une représentation abstraite de l'espace urbain fondée sur la théorie des graphes, où la ville est modélisée à travers un ensemble de nœuds et d'arêtes. Cette structure mathématique permet de décrire la topologie du tissu urbain en associant, selon les cas, les intersections, les rues, les bâtiments ou les zones bâties à des entités graphiques. Le réseau spatial agit ainsi comme un outil de discrétisation de la complexité urbaine, offrant un cadre analytique souple pour intégrer des données géoréférencées et étudier les propriétés structurelles de la ville. Dans la même perspective et en se focalisant sur le réseau viaire, Hamaina et al. (2012) définissent le réseau spatial comme une représentation géographique du réseau viaire urbain, modélisé sous forme de graphe spatial ou géométrique, c'est-à-dire un graphe dont les nœuds et les arcs sont ancrés dans l'espace et possèdent des propriétés topologiques et géométriques. Ce réseau est dit spatial parce qu'il conserve non seulement les relations topologiques (qui est connecté à quoi), mais aussi les propriétés métriques (longueurs, directions, distances euclidiennes), ce qui le distingue d'un graphe purement abstrait.

4. Réseaux spatiaux : approches de représentation et mesures d'analyse

Hamaina et al. (2012) définissent la représentation des réseaux spatiaux comme une modélisation à la fois géographique et abstraite du réseau viaire, fondée sur une structure de graphe ancrée dans l'espace. Selon Marshall et al. (2018), cette représentation constitue une étape fondamentale de l'analyse des réseaux urbains, en particulier du réseau viaire, puisqu'elle consiste à traduire une réalité spatiale concrète en une structure mathématique composée de nœuds et de liens. Cette démarche repose sur des choix conceptuels déterminants, qui orientent directement les résultats de l'analyse. Plusieurs types de graphes peuvent être construits selon l'entité choisie pour représenter les nœuds : jonctions, segments de rue, lignes axiales ou rues continues. Chaque type de représentation met en lumière des propriétés spécifiques du réseau telles que la circulation, la hiérarchie ou la visibilité et répond à des objectifs analytiques

distincts. Ainsi, modéliser un réseau spatial revient à produire une abstraction mathématique enracinée dans une configuration géographique réelle, ce qui les différencie des réseaux purement abstraits, sans référence à l'espace.

4.1. Représentation des réseaux spatiaux

Il existe plusieurs approches de représenter les réseaux urbains selon la manière dont on définit les nœuds et les arêtes. Ces différentes représentations mettent en lumière des propriétés différentes de la structure urbaine. En s'appuyant sur les principales références dans ce domaine, Agryzkov et al. (2017) distinguent et détaillent trois grandes méthodes de représentation et de modélisation des réseaux spatiaux : le graphe primal, le graphe dual (et ses variantes), ainsi que le graphe de Delaunay. Chacun propose une lecture particulière de l'espace urbain, fondée sur des logiques distinctes telles que la continuité, la visibilité ou la proximité. Le choix de la représentation, déterminé par les entités retenues pour modéliser les nœuds et les arêtes, influence directement les types d'analyses possibles (centralité, accessibilité, connectivité) et conditionne l'usage des outils de la théorie des réseaux. La représentation devient ainsi un acte déterminant, qui structure la lecture de la ville et l'interprétation de ses dynamiques spatiales.

4.1.1. Graphe primal « *primal graph* »

Appelé aussi graphe planaire, il constitue la représentation la plus directe du réseau urbain. Dans ce modèle, les intersections de rues sont traduites en nœuds et les rues elles-mêmes en liens (voir figure 7.12). Cette correspondance fidèle entre entités physiques et abstraites permet de conserver à la fois la topologie et la géométrie du tissu urbain. Le graphe primal est un graphe planaire non orienté qui peut être analysé à l'aide des matrices classiques d'adjacence, d'incidence et de degré. Il est particulièrement apprécié pour sa compatibilité avec les bases de données géospatiales et pour sa capacité à accueillir des informations contextuelles (flux, usages, densité, etc.) sur ses nœuds et arêtes.

4.1.2. Graphe dual « *Dual Graph* » et ses variantes

Appelé aussi graphe de lignes « *line graph* », repose sur une inversion des dimensions : les rues (arêtes du graphe primal) deviennent des nœuds, et les intersections deviennent des arêtes. Bien que ce modèle permette une nouvelle lecture du réseau, il conserve une structure relativement simple, avec une distribution des degrés également assez uniforme. Pour mieux capturer la complexité de la morphologie urbaine, différentes variantes étaient développées : l'approche par nom de rue « *named street* », qui regroupe les segments selon leur nom, mais pose des problèmes de fiabilité des données ; l'approche par linéarité visuelle issue de la psychologie gestaltiste, qui regroupe les segments suivant un angle obtus ; et enfin, l'approche de « *space syntax* », qui modélise l'espace sous forme de cartes axiales, représentant les lignes de vision et de déplacement sans obstruction.

4.1.3. Graphe de Delaunay

Constitue une approche différente, centrée non pas sur la topologie mais sur les relations géométriques de proximité. Il repose sur un principe de triangulation optimisant les connexions

entre nœuds selon leur distance euclidienne. Contrairement aux graphes précédents, son but est de modéliser les relations spatiales plutôt que les flux ou les continuités physiques. Ce graphe est planaire et chaque face y est un triangle. Il peut être appliqué à différents éléments de la ville (intersections, bâtiments, zones construites) et sert parfois de base à d'autres graphes comme le graphe de Gabriel, sous-graphe de Delaunay. Sa grande flexibilité le rend pertinent pour analyser des relations spatiales fines ou pour géo référencer différents objets urbains.

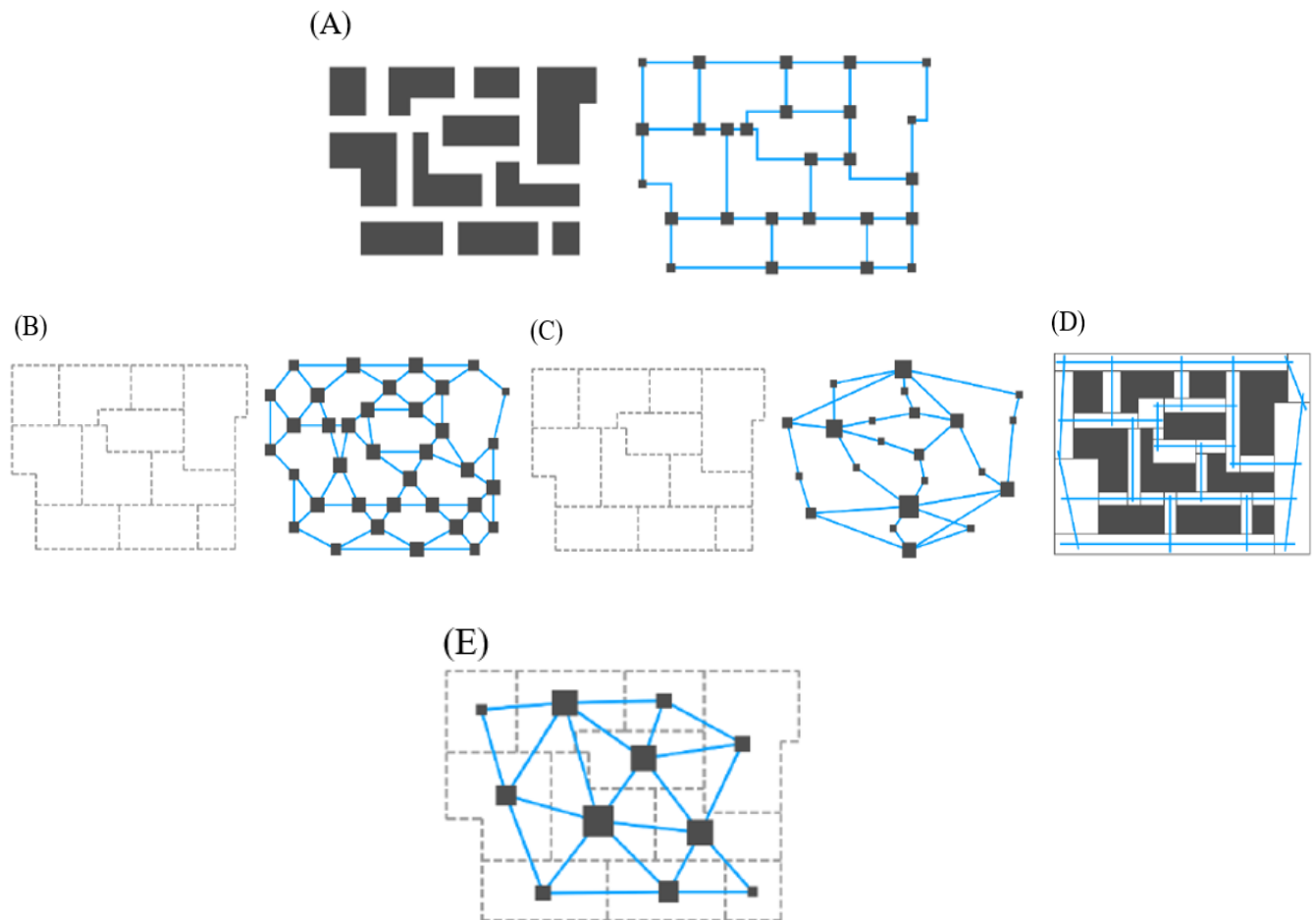


Figure 7.12. Représentation schématique des différents types des réseaux : (A) graphe primal ; (B), (C) et (D) graphe dual ; (E) graphe de Delaunay. Source : Agryzkov et al. (2017).

4.2. Mesures et indicateurs d'analyse

Lagesse (2015) confirme que les graphes ne sont pas seulement des outils de représentation, mais aussi des instruments d'analyse, car ils permettent de construire des indicateurs capables de révéler les différentes propriétés des systèmes qu'ils modélisent. En représentant un réseau sous forme de nœuds et de liens, il devient possible de mesurer des aspects comme la centralité, la connectivité ou l'accessibilité, mais aussi de développer de nouveaux indicateurs adaptés à la spatialité des réseaux viaires. Ces indicateurs permettent de comparer différents réseaux, d'identifier des régularités, et de quantifier les dynamiques de transformation, rendant ainsi lisibles les logiques d'organisation et d'évolution des structures urbaines et spatiales.

Avant d'exposer les indicateurs les plus utilisés dans le domaine de la théorie des réseaux, nous tenons basiquement à présenter les mesures d'un graphe. Comme le résume

Agryzkov et al. (2017), un graphe $G = (V, E)$ est une structure mathématique abstraite composée d'un ensemble V de n sommets ou nœuds, notés $v_1, v_2, \dots, v_n$, et d'un ensemble E de m arêtes ou liens, notés $e_1, e_2, \dots, e_m$. Les sommets représentent les entités (comme des intersections ou des objets), tandis que les arêtes représentent les connexions entre ces entités. Ainsi, le graphe modélise les relations entre éléments en reliant certains sommets par des arêtes, formant un réseau d'interconnexions.

Aussi, en théorie des graphes, on peut représenter mathématiquement un graphe sous forme de matrices. Ces matrices facilitent l'analyse et les calculs. Les matrices sont des outils essentiels pour représenter et analyser les graphes de manière rigoureuse. Les matrices les plus couramment utilisées sont la matrice d'adjacence et la matrice d'incidence. La première indique les connexions directes entre les sommets, tandis que la seconde précise quels sommets sont reliés à quelles arêtes. Ces représentations numériques permettent de manipuler les graphes avec des méthodes mathématiques et informatiques, facilitant ainsi le calcul de propriétés comme les centralités, les distances ou les parcours. Elles rendent les graphes lisibles, exploitables et compatibles avec les algorithmes d'analyse de réseaux.

- **Matrice d'adjacence $A(G)$**

La matrice d'adjacence est une matrice carrée de taille $n \times n$, où n est le nombre de sommets. Elle indique quelles paires de sommets sont connectées entre elles, Définition :

- $a_{ij} = 1$ s'il existe une arête entre v_i et v_j
- $a_{ij} = 0$ sinon
- $a_{ii} = 0$ (pas de boucles)

Exemple (graphe A—B—C)

$$A(G) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

- **Matrice d'incidence $B(G)$**

La matrice d'incidence est une matrice de taille $n \times m$ (n sommets, m arêtes). Elle décrit quelles arêtes sont incidentes à quels sommets, définie comme :

- $b_{ij} = 1$ si le sommet v_i est incident à l'arête e_j .
- $b_{ij} = 0$ sinon.
- Dans un graphe non orienté, chaque colonne contient exactement deux 1.

Exemple (graphe A—B—C, avec $e_1 = A-B$ et $e_2 = B-C$) :

$$B(G) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

4.3. Indicateurs globaux

Les indicateurs globaux, également appelés indicateurs structurels, permettent de caractériser la structure générale d'un réseau dans son ensemble, par opposition aux mesures locales centrées sur les nœuds ou les liens. Ils fournissent des informations sur la taille du réseau, la

densité de ses connexions, son efficacité en matière de connectivité, ainsi que sa propension à former des clusters, c'est-à-dire des groupes de nœuds fortement interconnectés. (Boeig, 2017). Les indicateurs globaux les plus significatifs et les plus utilisés sont :

- **Nombre de nœuds « N »**

Le nombre de nœuds, noté généralement N (ou parfois V), représente le nombre total de sommets dans un graphe. Chaque nœud correspond à une entité ou un point du réseau peut être connecté à d'autres nœuds via des liens. C'est une mesure fondamentale dans le graphe, indispensable au calcul de nombreux indicateurs

- **Nombre de liens « E »**

Le nombre de liens (appelé aussi nombre d'arêtes ou nombre d'arcs, selon le type de graphe) se note généralement E ou K et représente le nombre total de connexions entre les nœuds du graphe.

- **Degré moyen $\langle k \rangle$**

Noté $\langle k \rangle$, représente la moyenne du nombre de connexions (ou arêtes) par nœud. Il s'agit d'un indicateur global de connectivité qui permet d'apprécier à quel point les éléments du réseau sont directement reliés entre eux. Dans le contexte des réseaux urbains, un degré moyen élevé indique une densité de connexions plus importante, ce qui reflète un maillage plus serré des voies ou une plus grande accessibilité locale. Calculé selon la formule :

$$\langle k \rangle = 2E / N \quad (7.1)$$

Où E est le nombre d'arêtes, et N le nombre de nœuds.

- **Longueur moyenne des chemins « L »**

Appelé aussi longueur moyenne « *Average path length* », notée l. Il mesure l'efficacité de la connectivité d'un graphe. Il correspond à la moyenne des plus courts chemins (ou distances géodésiques) entre toutes les paires de nœuds du réseau. En d'autres termes, il indique combien d'arêtes, en moyenne, il faut parcourir pour aller d'un nœud à un autre dans le graphe. Dans un réseau urbain, une faible longueur moyenne indique une bonne accessibilité globale et une structure efficace en termes de déplacement. À l'inverse, une longueur moyenne élevée suggère une organisation plus dispersée ou moins connectée. Cet indicateur est particulièrement pertinent pour évaluer l'efficacité topologique d'un système de rues. Il est formulé ainsi :

$$L = (1 / [N(N-1)]) \sum_{i \neq j} d(i, j) \quad (7.2)$$

Où : N est le nombre total de nœuds dans le graphe, et d_{ij} est la longueur du plus court chemin entre les nœuds i et j

- **Coefficient de clustering global « CC »**

Noté CC, il évalue la tendance d'un graphe à former des groupes fortement connectés, c'est-à-dire la propension des voisins d'un nœud à être également connectés entre eux. Cette

mesure donne une idée de la cohésion locale du réseau dans son ensemble. Elle est définie comme la moyenne des coefficients de clustering locaux calculés pour chaque nœud. Dans le contexte des réseaux urbains, un CC élevé indique que les rues tendent à former des motifs locaux cohérents et bien connectés (ex. îlots urbains denses), tandis qu'un CC faible reflète un réseau plus arborescent ou linéaire, avec moins de redondance locale. Calculé selon la formule :

$$CC = (1 / N) * \sum_{i=1}^N C_i \quad (7.3)$$

Où C_i est le coefficient de clustering local du nœud i , et N est le nombre total de nœuds dans le graphe.

- **Diamètre « D »**

Noté D , correspond à la plus grande distance minimale entre deux nœuds du réseau. Autrement dit, c'est la longueur du plus long chemin parmi les plus courts chemins entre toutes les paires de nœuds. Cette valeur indique la taille maximale du graphe en termes de connectivité, et permet d'évaluer l'étendue ou la compacité du réseau. Un diamètre faible signifie que toutes les parties du réseau sont relativement accessibles, tandis qu'un diamètre élevé peut indiquer un réseau étendu, fragmenté ou peu intégré. Dans un réseau urbain, cela reflète la distance maximale qu'un usager doit parcourir pour aller d'un point à un autre par le chemin le plus court.

- **Densité du graphe « δ »**

Noté δ , il mesure le rapport entre le nombre de liens existants dans le graphe et le nombre maximal de liens possibles entre les nœuds. Il permet d'évaluer à quel point le graphe est connecté dans son ensemble. Une densité proche de 1 indique un graphe très connecté, tandis qu'une densité proche de 0 signale un graphe peu connecté. Cet indicateur est particulièrement utile pour comparer différents réseaux de tailles différentes ou pour observer des dynamiques d'évolution de connectivité. Calculé selon la formule :

$$\delta = 2E / N(N-1) \quad (7.4)$$

Où E est le nombre d'arêtes, et N le nombre de nœuds.

4.4. Indicateurs locaux

Les indicateurs locaux dans un graphe permettent de décrire les propriétés immédiates d'un nœud, en se basant uniquement sur son voisinage direct. Ils sont essentiels pour analyser et identifier les caractéristiques topologiques locales. Le principal indicateur local est le degré d'un nœud, qui correspond au nombre de liens qu'il entretient avec d'autres nœuds. Un autre indicateur local important est le coefficient de clustering, qui mesure la tendance des voisins d'un nœud à être eux-mêmes connectés, traduisant ainsi le niveau de cohésion locale. Ces mesures, fondées sur des informations strictement locales, sont particulièrement utiles pour comprendre la structure microscopique d'un réseau, repérer les zones denses ou faiblement connectées, et détecter des configurations spécifiques dans les réseaux spatiaux (Jiang et Claramunt, 2004).

- **Degré d'un nœud « k_i »**

Noté k_i , il mesure le nombre de connexions directes qu'un nœud entretient avec les autres nœuds du graphe. Il s'agit de l'une des mesures les plus simples et les plus fondamentales en théorie des graphes. Cet indicateur permet d'évaluer l'importance immédiate d'un nœud dans le réseau. Un nœud ayant un degré élevé est généralement central ou bien connecté, tandis qu'un nœud de faible degré est souvent périphérique. En analyse spatiale, le degré peut, par exemple, indiquer le nombre de rues qui convergent vers une intersection. Calculé selon la formule :

$$k_i = \sum a_{ij} \text{ (pour } j \text{ allant de } 1 \text{ à } N) \quad (7.5)$$

Où : k_i : degré du nœud i , N : nombre total de nœuds dans le graphe, et a_{ij} : élément de la matrice d'adjacence ; $a_{ij} = 1$ si une arête relie le nœud i au nœud j , et $a_{ij} = 0$

- **Clustering local « C_i »**

Noté C_i , il indique dans quelle mesure les voisins d'un nœud sont également connectés entre eux. Il permet ainsi d'évaluer la densité des connexions locales autour du nœud i . Autrement dit, il indique la probabilité que deux voisins d'un même nœud soient eux-mêmes voisins. La valeur de C_i est comprise entre 0 et 1 : plus elle est proche de 1, plus les voisins de i forment un groupe fortement connecté ; si elle est proche de 0, cela signifie qu'ils sont faiblement connectés ou pas du tout. Le clustering local est particulièrement utile pour repérer des structures communautaires ou des zones urbaines à forte interconnectivité locale dans les réseaux spatiaux. L'indicateur est calculé selon la formule :

$$C_i = 2e_i / (k_i(k_i - 1)) \quad (7.6)$$

Où k_i est le degré du nœud i , c'est-à-dire le nombre de ses voisins, et e_i est le nombre de liens effectivement observés entre ces voisins. Le dénominateur $k_i(k_i - 1)/2$ correspond au nombre maximal possible de connexions entre les voisins de i , tandis que le numérateur $2e_i$ permet de comptabiliser correctement ces liens (chaque lien étant partagé par deux nœuds)

4.5. Indicateurs de centralité

Porta et al. (2006), ainsi que Crucitti et al. (2006), définissent la centralité comme une mesure structurelle permettant d'identifier les nœuds les plus importants ou les plus influents dans un graphe, en fonction de leur position et de leurs relations avec les autres nœuds. Elle rend compte de la capacité d'un nœud à jouer un rôle central ou crucial dans l'organisation et le fonctionnement global du réseau. La centralité est multifacette ne se réduit pas à un seul indicateur, mais se manifeste en plusieurs dimensions complémentaires. Chaque indice de centralité permet de saisir un aspect spécifique de la manière dont un espace est parcouru, connecté ou structurellement déterminant pour le réseau : être proche de l'ensemble des autres nœuds (*closeness centrality*), relier différentes parties du graphe en servant d'intermédiaire (*betweenness centrality*), offrir des trajets directs (*straightness centrality*), ou encore contribuer à la robustesse et à l'efficacité globale du réseau (*information centrality*).

- **Centralité de degré « *Centrality degree, CD* »**

Mesure le nombre de connexions directes qu'un nœud entretient avec d'autres. Elle renseigne sur la connectivité locale d'un nœud dans le réseau. Dans un réseau urbain, cela correspond par exemple au nombre de rues débouchant sur une intersection. Plus ce nombre est élevé, plus le nœud est considéré comme central en termes d'accessibilité immédiate. Calculée selon la formule :

$$Cd(i) = k_i / (N - 1) \quad (7.7)$$

Où k_i est le nombre de liens connectés au nœud i , et N est le nombre total de nœuds dans le graphe.

- **Centralité de proximité « *Closness centrality, CC* »**

Mesure la distance moyenne d'un nœud à l'ensemble des autres nœuds du graphe. Elle est définie comme l'inverse de la somme des distances les plus courtes entre un nœud donné et tous les autres, ce qui permet d'évaluer sa proximité topologique globale dans le réseau. Cette mesure reflète la capacité d'un nœud à atteindre rapidement tous les autres, ce qui en fait un indicateur pertinent pour identifier les centres d'accessibilité ou les pôles bien connectés. Calculée selon la formule :

$$Cc(i) = (N - 1) / \sum d(i, j) \quad (7.8)$$

Où $d(i, j)$ est la distance géodésique (plus court chemin) entre i et j .

- **Centralité d'intermédiarité « *Betweenness centrality, CB* »**

Mesure la capacité d'un nœud à se situer sur les chemins les plus courts entre d'autres nœuds (contrôle de l'information). Elle mesure le nombre de fois qu'un nœud se trouve sur les plus courts chemins reliant les autres paires de nœuds. Elle est utile pour identifier les points de passage obligés ou les articulations structurelles du réseau. Elle mesure le contrôle qu'un nœud exerce sur les flux du réseau. Un nœud avec une forte centralité d'intermédiarité joue souvent un rôle de carrefour stratégique ou de point de passage obligé dans les interactions entre d'autres nœuds. Calculée selon la formule :

$$Cb(i) = \sum (\sigma_{jk}(i) / \sigma_{jk}) \quad (7.9)$$

Pour tous les couples $j \neq k \neq i$, où σ_{jk} est le nombre de plus courts chemins entre j et k , et $\sigma_{jk}(i)$ est le nombre de ces chemins passant par i .

- **Centralité de rectitude « *Straightness centrality, CS* »**

Quantifie le degré de déviation par rapport à une ligne droite. Elle mesure l'efficacité géométrique des chemins depuis un nœud donné vers tous les autres, en comparant la longueur réelle des plus courts chemins dans le graphe à la distance euclidienne directe (en ligne droite) entre les mêmes paires de nœuds. Elle reflète dans quelle mesure les chemins empruntés dans le réseau sont directs. Un nœud a une centralité de rectitude élevée s'il permet de relier

rapidement, et sans détours, d'autres nœuds dans le réseau. Dans le contexte urbain, cela peut correspondre à des rues ou intersections alignées avec les grands axes, favorisant des déplacements directs. Calculée selon la formule :

$$Cs(i) = (1 / (N - 1)) * \sum (d_E(i, j) / d_G(i, j)) \quad (7.10)$$

Où $d_E(i, j)$ est la distance euclidienne entre i et j , et $d_G(i, j)$ est la distance géodésique (plus court chemin sur le graphe).

- **Centralité d'information « *Information centrality*, CI »**

Mesure la perte d'efficacité globale du réseau si un nœud est supprimé. Elle évalue l'importance d'un nœud dans la capacité globale du réseau à transmettre l'information ou à rester connecté. Elle repose sur le changement de l'efficacité globale du réseau lorsque ce nœud (ou ses liens) est supprimé ou dégradé. Cette mesure évalue l'effet structurant d'un nœud sur la connectivité du réseau. Plus sa suppression dégrade l'efficacité, plus il est central. Elle est particulièrement utile pour identifier les vulnérabilités, les points critiques, ou les nœuds structurants dans un réseau urbain. Calculée selon la formule :

$$Ci(i) = (1 / (N - 1)) * \sum [(E(G) - E(G_i)) / E(G)] \quad (7.11)$$

où $E(G)$ est l'efficacité du graphe complet, et $E(G_i)$ est l'efficacité du graphe privé du nœud i .

4.6. Distribution spatiale et statistique des indicateurs

Selon Boeing (2017a) la distribution spatiale des réseaux désigne la manière dont les éléments constitutifs d'un réseau, notamment les nœuds et les liens, sont disposés et interconnectés dans l'espace géographique. Elle reflète les dynamiques historiques, fonctionnelles et morphogénétiques propres aux différents contextes urbains, révélant les structures hiérarchiques (axes majeurs, voies secondaires), les zones de centralité ou de marginalité, ainsi que les discontinuités spatiales significatives. Cette distribution, à la fois géométrique et topologique, permet d'analyser l'organisation, la hiérarchie et la structure des réseaux viaires. Elle met en évidence les logiques d'accessibilité, de centralité, de connectivité. En ce sens, elle constitue un révélateur des dynamiques morphogénétiques à l'œuvre dans les systèmes urbains, et participe à la compréhension de leur complexité, et de leur évolution à différentes échelles.

En mobilisant les systèmes d'information géographique (SIG), associés à des outils spécialisés comme les plug-ins «*Morpheo*» (Lagesse, 2015), «*Urban Network Analysis (UNA)*» (Sevtsuk, 2018) et autres, ainsi qu'à des bibliothèques Python open source telles que «*NetworkX*» (Georgiev, 2015), «*OSMnx*» (Boeing, 2017b) ou «*Momepy*» (Fleischmann, 2019), l'analyse des réseaux peut s'appliquer à différents types de graphes spatiaux, qu'ils soient primal ou dual. La distribution spatiale des réseaux permet alors de mesurer divers indicateurs structuraux (densité, degré, clustering...) ainsi que des indicateurs de centralité (*closeness*, *betweenness*, *straightness*, *information centrality*...). Porta et al. (2006), ainsi que Crucitti, Latora et Porta (2006), définissent la distribution spatiale des centralités comme la répartition géographique des valeurs de centralité calculées sur le graphe primal du réseau viaire

urbain. En associant chaque valeur d'un indice à sa localisation géographique, qu'il s'agisse d'un nœud ou d'un segment de rue, cette approche permet de visualiser comment la centralité se manifeste dans l'espace urbain, notamment à travers des cartes thématiques générées par les SIG, où les nœuds sont colorés selon des classes d'écart-types autour de la moyenne. Cette représentation met en évidence les zones de forte connectivité, les axes structurants ou les secteurs périphériques, révélant la manière dont les propriétés topologiques du réseau se traduisent en une organisation morphologique concrète.

Dans une logique complémentaire, Jiang (2004, 2007) propose une lecture de la distribution spatiale des réseaux viaires à travers une représentation en graphe dual, fondée sur le concept de « *natural streets* ». Celles-ci sont définies comme des rues continues, construites sur la base de la continuité angulaire, c'est-à-dire la tendance naturelle des segments de rue à s'enchaîner selon des seuils de déviation angulaire faibles. Dans ce modèle, les « *natural streets* » sont représentées comme des nœuds, tandis que leurs intersections sont modélisées comme des liens. Cette inversion par rapport au graphe primal, dans lequel les intersections sont des nœuds et les rues des arêtes, permet une analyse topologique détachée des dimensions métriques, centrée sur les relations d'interconnexion entre les entités viaires. Cette approche met en lumière la hiérarchisation interne du réseau, en révélant comment certaines rues fortement connectées dans le graphe dual assument un rôle central dans la structuration du tissu urbain, alors que d'autres, peu connectées, occupent des positions plus périphériques ou locales. Elle permet ainsi d'identifier des structures émergentes qui ne sont pas nécessairement visibles par une simple lecture morphologique ou métrique du réseau. Par ailleurs, cette modélisation dépasse l'analyse statique de la forme urbaine en rendant compte des logiques fonctionnelles et cognitives qui orientent les pratiques de déplacement, la perception de l'espace, et les processus de morphogenèse.

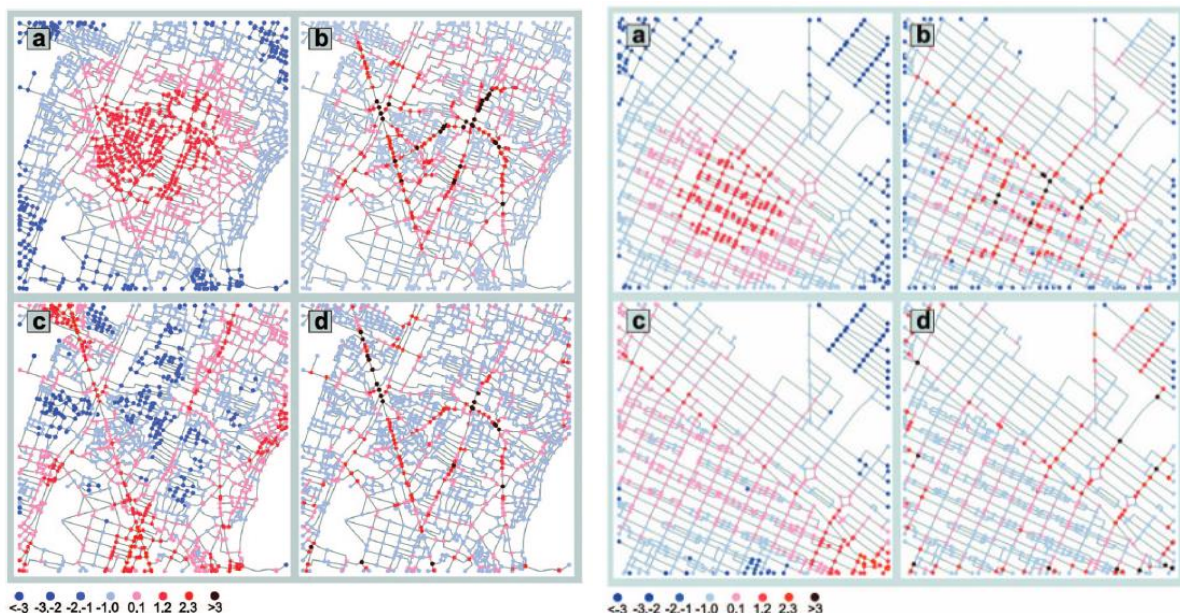


Figure 7.13. Distribution spatiale des indicateurs de centralité. Source : Porta et al. (2006).

En prolongement de l'analyse de la distribution spatiale des indicateurs renseignant sur leur implantation géographique dans le tissu urbain, la distribution statistique s'intéresse à la

répartition quantitative des valeurs de ces indicateurs à travers l'ensemble des éléments du réseau, qu'il s'agisse des nœuds ou des liens. Elle consiste à examiner la fréquence des différentes valeurs observées pour des mesures telles que le degré, les centralités, ou la longueur des liens, afin de mettre en évidence des régularités statistiques ou des hétérogénéités structurelles (Strano et al., 2013). L'objectif est d'identifier la présence éventuelle de lois de distribution caractéristiques, comme les lois normales ou les lois de puissance, qui traduisent des formes spécifiques d'organisation interne du réseau. Ces distributions permettent de déterminer si le réseau est homogène ou hiérarchisé, s'il présente des structures fortement centralisées ou dispersées, et si certaines entités occupent des positions disproportionnées dans le réseau.

Dans ce cadre, les travaux pionniers de Barabási et Albert (1999) ont marqué un tournant en démontrant que de nombreux réseaux réels, tels que les réseaux biologiques, technologiques ou urbains, présentent une structure invariante d'échelle « *scale-free* ». Ce type de réseau se caractérise par une distribution en loi de puissance du degré des nœuds, exprimée par la formule :

$$p(k) \propto k^{-\gamma} \quad (7.12)$$

Où $P(k)$ est la probabilité qu'un nœud ait k connexions, et γ est un exposant positif généralement compris entre 2 et 3.

Cette loi reflète une organisation hétérogène du réseau : une petite minorité de nœuds très connectés concentre la majorité des interactions, tandis que la grande majorité des nœuds présente un faible degré de connexion. La structure invariante d'échelle, très différente de celle des réseaux aléatoires, révèle des mécanismes d'auto-organisation et de croissance préférentielle, selon lesquels les nœuds déjà bien connectés ont une probabilité plus élevée d'attirer de nouvelles connexions. Cette considération a été largement reprise dans les études urbaines sur les réseaux spatiaux, notamment par Jiang (2004, 2007) à propos des degrés de nœuds, Porta et al. (2006) ainsi que Crucitti et al. (2006) à travers les centralités, puis, plus récemment, dans des travaux tels que ceux d'Akbarzadeh et al. (2018), Rauber et Krafta (2018), Ma et al. (2020), parmi d'autres, s'intéressant à divers indicateurs. Les résultats ont révélé une structuration hiérarchique marquée des réseaux viaires. Dans le contexte urbain, ce modèle d'invariance d'échelle permet de rendre compte de l'organisation hiérarchisée des réseaux de rues, où un petit nombre d'artères principales concentre une grande partie de la connectivité, tandis que la majorité des voies secondaires restent faiblement connectées et marginales dans la structure globale. En révélant les différences de structure au sein du réseau, cette distribution statistique complète l'analyse spatiale en facilitant la compréhension des logiques d'organisation propres à la morphogenèse urbaine.

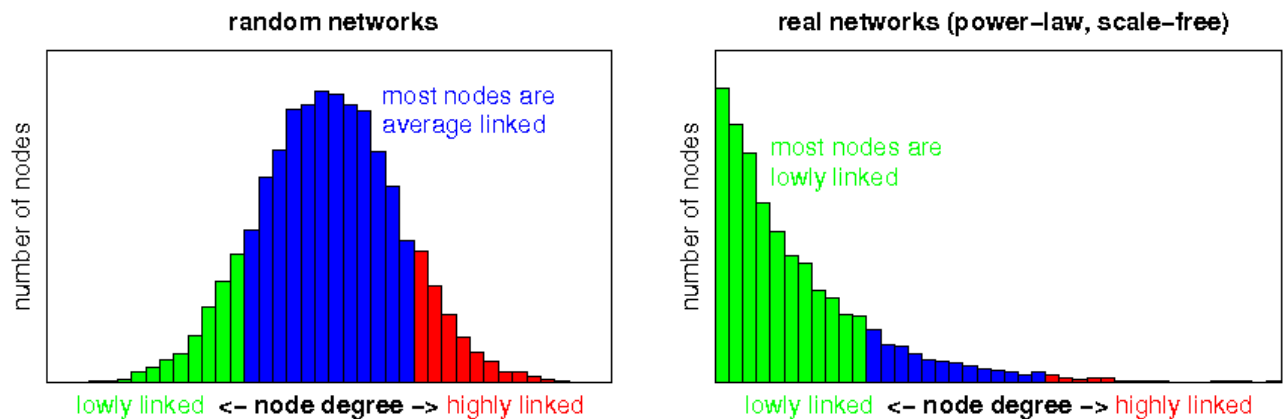


Figure 7.14. Distribution du degré de nœuds dans un réseau aléatoire et dans un réseau invariant d'échelle. Source : http://www.network-science.org/powerlaw_scalefree_node_degree_distribution.html, consulté en septembre 2024

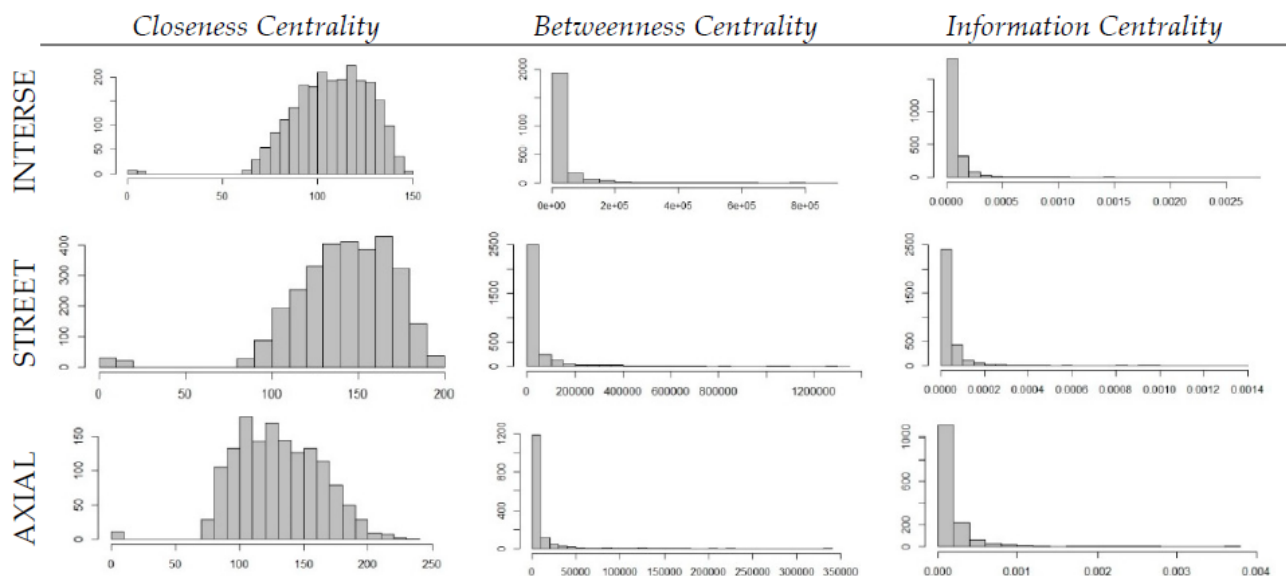


Figure 7.15. Distribution des indicateurs de centralité, représentés en histogrammes. Source : Rauber et Krafta (2018).

Par ailleurs, cette distribution selon une loi de puissance est étroitement liée au caractère fractal des réseaux urbains, en particulier des réseaux viaires, qui se composent d'un petit nombre d'éléments très connectés, aux côtés d'un grand nombre d'éléments faiblement connectés. Les fractales se caractérisent par la répétition de motifs similaires à différentes échelles, et les distributions statistiques invariantes d'échelle, comme les lois de puissance, traduisent justement l'expression d'un même comportement à plusieurs niveaux d'observation. Ainsi, l'analyse du réseau viaire révèle que la complexité morphologique des villes se manifeste également à un niveau structurel à travers des régularités mathématiques de nature fractale (Boeing, 2018). Divers travaux appliquant l'analyse des distributions statistiques, notamment celui de Clauset et al. (2009), ont contribué à renforcer la rigueur méthodologique en proposant des outils permettant de tester l'existence de telles lois de distribution et de les distinguer d'autres distributions proches, telles que les lois log-normales ou exponentielles. Ainsi, l'analyse statistique ne se limite pas à une simple description quantitative : elle permet de mettre

en évidence des propriétés émergentes et des dynamiques de formation du réseau, souvent liées à des processus d'auto-organisation ou de croissance préférentielle, caractéristiques des systèmes complexes.

5. Génération et mesure des réseaux spatiaux : méthodes et outils

Comme décrit dans les sections précédentes, la modélisation des systèmes urbains repose sur l'identification des éléments fondamentaux permettant de représenter de manière adéquate le phénomène étudié, en tenant compte de sa dimension spatiale, essentielle à sa compréhension. L'un des principaux défis réside dans la localisation précise des objets physiques et dans l'intégration des effets de l'espace dans les interactions entre ces objets (Bretagnolle et al., 2006). Pour répondre à ces exigences, un cadre flexible en termes de types de données, de résolution, ou de capacité à intégrer de multiples couches d'information est nécessaire afin de représenter ces éléments dans l'espace géographique, tout en considérant leur possible évolution dans le temps. Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) tel que les plateformes QGIS, ArcGis, Map Info et bien d'autres constituent des outils particulièrement adaptés à ces exigences.

En effet, il s'agit de systèmes spécialisés dans la saisie, le stockage, la manipulation, l'analyse et la visualisation d'informations géoréférencées. Leur atout fondamental réside dans leur capacité à établir des liens entre des données spatiales et des informations non spatiales, ce qui en fait des outils particulièrement utiles dans de nombreux domaines d'application concrets, tels que la planification de la mobilité, la modélisation de l'accessibilité aux équipements, ou encore l'analyse des dynamiques urbaines. (McHaffie, Hwang, & Follett, 2019). Ainsi, divers types de données attributaires peuvent être représentés sous différentes formes, et articulés à des objets géométriques inscrits dans l'espace. Les SIG offrent une plateforme complète pour collecter, structurer, analyser et diffuser des données géographiques. Chaque objet spatial, identifié par un identifiant unique et représenté sur une carte, est associé à un ensemble d'attributs stockés dans une base de données. Par exemple, l'emplacement et la forme d'un hôpital peuvent être cartographiés en deux dimensions, tandis que des données associées, comme le nombre de patients, la capacité d'accueil ou encore l'adresse postale, sont liées à cet objet dans la base d'informations. Les SIG permettent ainsi d'explorer de nombreuses problématiques urbaines en croisant données spatiales et attributaires (Ferrari & Rae, 2019).

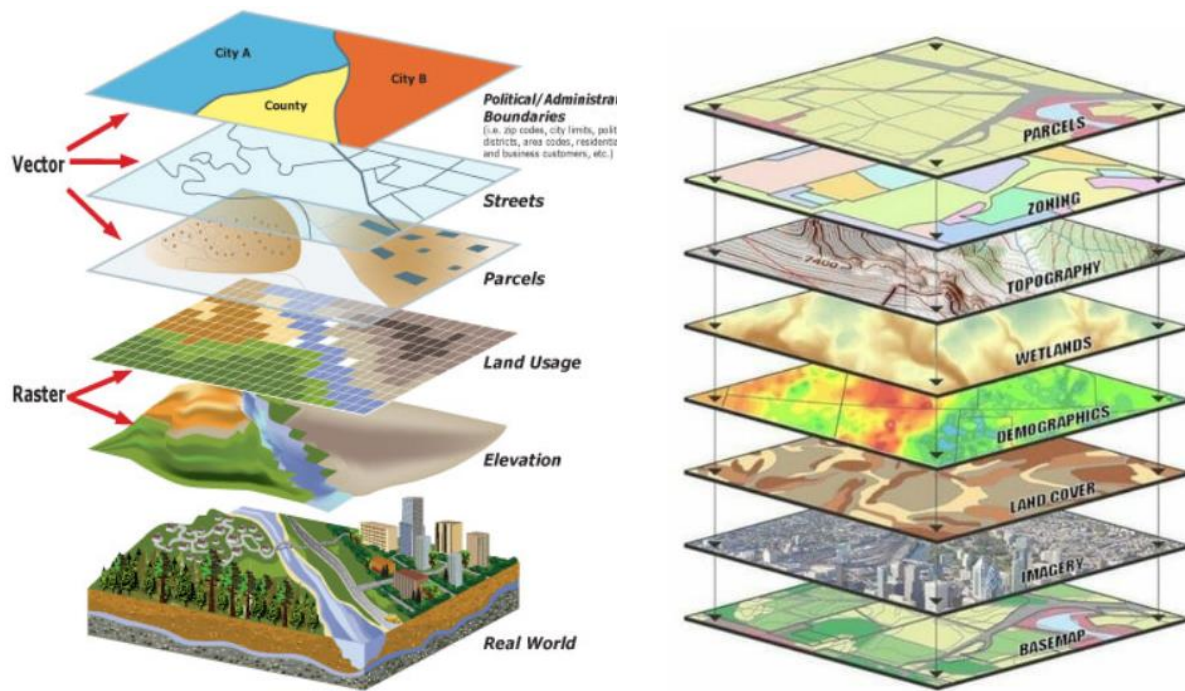


Figure 7.16. Représentation schématique du fonctionnement des SIG. Source : <https://manual.giscloud.com/knowledge-base/what-is-gis/>, consulté en mars 2025.

Un SIG intègre deux représentations des éléments sur une carte :

- **La représentation matricielle (raster)**, dans cette méthode l'espace est décomposé en une grille régulière de cellules, généralement carrées, chacune localisée par un couple de coordonnées (x,y) et identifiée par un identifiant unique. Chaque cellule correspond à une entité dans la base de données et peut contenir diverses informations, telles que l'occupation du sol (information descriptive), le revenu moyen des ménages (quantitative), ou encore l'altitude moyenne (coordonnée z). Bien que d'autres formes géométriques soient possibles (hexagones, triangles), le carré reste la plus utilisée.
- **La représentation vectorielle**, elle modélise l'espace comme un continuum, à partir d'éléments géométriques discrets : points, lignes et polygones. Chaque entité vectorielle est associée à des coordonnées précises : un point est défini par un couple (x,y), une ligne droite par deux couples, et une polyligne par une séquence de segments (une polyligne fermée formant un polygone). Par exemple, la position d'un arbre peut être modélisée par un point, un tronçon de rue par une ligne, une rivière par une polyligne, et l'emprise d'un bâtiment scolaire par un polygone.

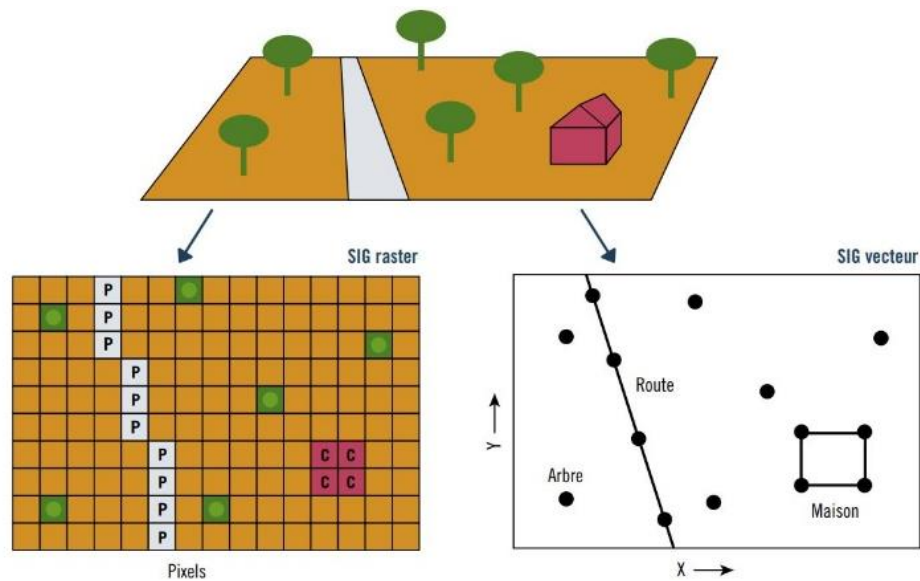


Figure 7.17. Représentation schématique des données en raster et en vecteurs. Source : <https://expertgeo.cm/difference-entre-donnees-vecteur-et-donnees-raster/>, consulté en mars 2025.

Les SIG permettent aux systèmes urbains d'être représentés à différents niveaux d'observation, chacun correspondant à une méthode de représentation spécifique. Les entités qui composent ces systèmes peuvent avoir zéro dimension (points), une dimension (lignes), deux dimensions (surfaces) ou trois dimensions (volumes). Par ailleurs, la dimension attribuée à un objet dépend de l'échelle d'observation : un même élément physique peut ainsi être modélisé de manière différente selon le niveau de détail requis. Dans de nombreux cas, la représentation vectorielle s'avère plus appropriée. Elle permet une description géométrique précise des objets spatiaux à l'aide des points, des lignes et des polygones, auxquels sont associées des informations attributaires. Cette forme de représentation est particulièrement adaptée à l'analyse des relations topologiques, au calcul de métriques géométriques (longueurs, surfaces, périmètres), ainsi qu'à la modélisation de réseaux spatiaux comme les réseaux viaires, de transport ou d'assainissement. Elle se distingue ainsi de la représentation raster, fondée sur une grille régulière de cellules, mieux adaptée à l'analyse continue de phénomènes surfaciques ou environnementaux.

Parmi ces réseaux spatiaux, les réseaux viaires occupent une place centrale dans la modélisation urbaine. Ils sont couramment considérés comme des ensembles d'éléments physiques homogènes, connectant différents lieux et se croisant aux intersections (Marshall et al., 2018). Dans un environnement SIG, ces réseaux peuvent être représentés sous forme raster ou vectorielle. Cependant, la représentation raster soulève certaines limites : la taille des cellules conditionne la précision géométrique et topologique, rendant difficile une modélisation du tracé viaire. À l'inverse, la représentation vectorielle est généralement mieux adaptée pour décrire les réseaux viaires. Elle permet de représenter avec précision les axes de circulation sous forme de lignes et les intersections sous forme de points, facilitant ainsi leur intégration dans une structure de graphe. Ces données vectorielles peuvent être obtenues par numérisation à partir d'orthophotographies ou d'images satellites (voir figure 7.18), ou encore extraites automatiquement via des techniques de traitement d'image. Ce mode de représentation offre une correspondance directe avec les structures de la théorie des graphes, dans laquelle le réseau

viaire est modélisé par des nœuds (intersections) et des liens (tronçons de rue). Pour appliquer les méthodes analytiques issues de cette théorie, il est nécessaire de transformer le réseau viaire en un graphe. Comme exposé dans les sections précédentes, deux grandes approches sont possibles :

- **La représentation primale**, dans laquelle les nœuds correspondent aux intersections et les arêtes aux segments de rue. Elle conserve la géométrie physique du réseau et est bien adaptée aux calculs de distance, d'accessibilité ou de centralité spatiale.
- **La représentation duale**, où les nœuds représentent les rues elles-mêmes et sont reliés lorsqu'elles se croisent ou se prolongent. Cette approche est utile pour analyser la structure topologique du réseau indépendamment de sa forme physique (voir figure 7.19).

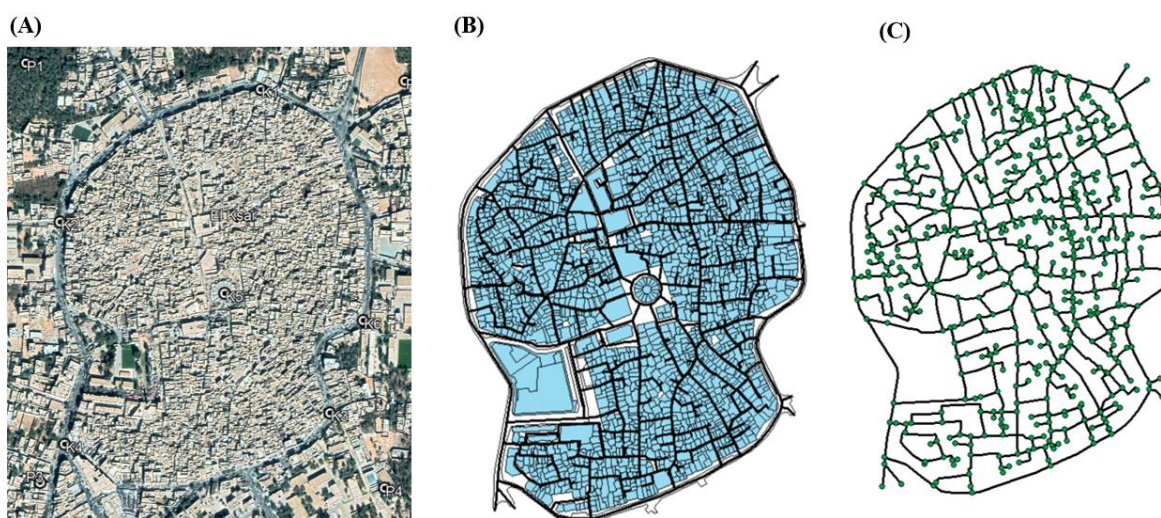


Figure 7.18. Processus de génération du graphe primal du Ksar de Ouargla : (A) image satellitaire ; (B) vectorisation du réseau viaire par SIG ; (C) génération du graphe primal. Source : auteur.

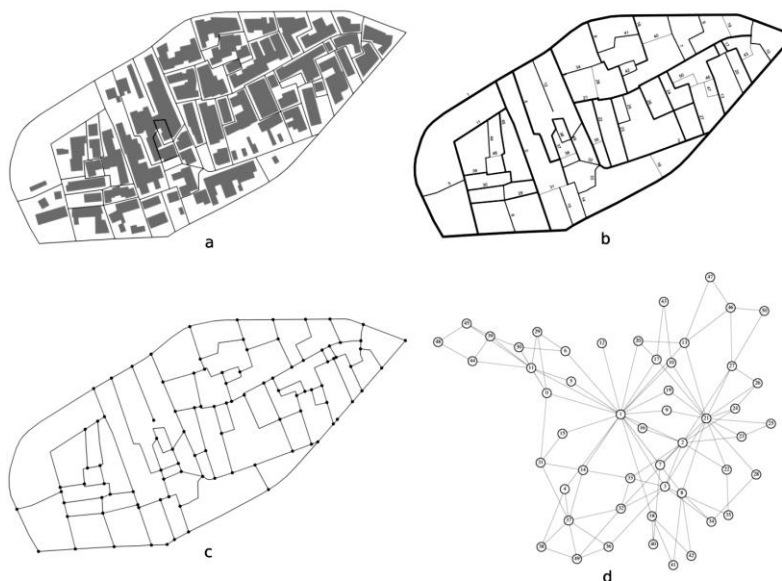


Figure 7.19. Fragment urbain et génération des différents graphes correspondant. Source : Hamaina et al. (2012).

. Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière l'apport décisif de la science des systèmes complexes pour penser la ville comme un système spatial complexe, dynamique, et évolutif. En rupture avec les approches descriptives ou strictement fonctionnelles, cette perspective permet de comprendre la morphogenèse urbaine comme un processus d'émergence de la forme, fondé sur des interactions multiples distribuées dans l'espace et le temps. Dans ce cadre, la théorie des réseaux s'impose comme une méthode de la complexité particulièrement féconde pour modéliser les dynamiques urbaines. En représentant la ville comme un réseau d'entités interconnectées, notamment à travers le réseau viaire, support fondamental des interactions spatiales, cette approche permet de saisir les logiques profondes d'organisation du tissu urbain. Elle révèle une multitude de propriétés telles que la centralité, l'accessibilité, la hiérarchie ou la modularité, qui structurent la forme urbaine au-delà de son apparence irrégulière.

La première section a mis en évidence la nécessité d'une transition épistémologique : passer d'une lecture géométrique ou mécaniste de l'espace urbain à une vision systémique et relationnelle. Cette approche permet de saisir la ville comme un système ouvert, dynamique, adaptatif, dont l'organisation émerge des interactions multiples entre ses éléments constitutifs. La seconde partie a introduit la notion de morphogenèse urbaine, entendue comme un processus spatial de formation de la forme. Elle a souligné que la structure de la ville ne résulte pas seulement de planifications exogènes, mais de régulations internes, incrémentales, qui façonnent l'espace au fil du temps. La troisième section a montré que la théorie des réseaux, en tant qu'outil de modélisation des relations dans un système complexe, fournit un cadre analytique pertinent pour formaliser la structure de l'espace urbain. En particulier, la modélisation du réseau viaire comme réseau spatial permet de mettre en évidence différentes propriétés telles que la centralité, la hiérarchie, la modularité des connexions, qui reflètent les logiques profondes de l'organisation spatiale. La quatrième section a présenté les principales modalités de représentation des réseaux spatiaux et les mesures d'analyse issues de la théorie des graphes, qui permettent de quantifier la structure du réseau viaire et de révéler sa logique morphologique implicite.

Enfin, la dernière section a montré comment ces approches peuvent être mises en œuvre de manière opérationnelle à l'aide des Systèmes d'Information Géographique (SIG), rendant possible l'extraction, la construction et l'analyse de réseaux spatiaux à partir de données géographiques réelles. L'ensemble du chapitre a ainsi démontré la pertinence d'un cadre théorique et méthodologique articulant science des systèmes complexes, théorie des réseaux et analyse spatiale pour étudier la morphogenèse urbaine. Ce cadre est généralisable à l'étude de la ville dans sa diversité, mais il s'avère particulièrement adapté aux villes islamiques traditionnelles, dont le développement organique, incrémental et fortement structuré par le réseau viaire incarne exemplairement les logiques de formation propres aux systèmes complexes.

. Notes et références bibliographiques

Bertalanffy, L. von. (1968). *General system theory: Foundations, development, applications*. New York: George Braziller Inc.

Tirico, M. (2020). *Morphogenesis of complex networks: An application in urban growth* [Thèse de doctorat, Université Le Havre Normandie]. Le Havre : Université Le Havre Normandie.

Le Moigne, J.-L. (1974). *Les systèmes de décision dans les organisations*. Paris: Presses Universitaires de France.

Cambien, A. (2007). *Une introduction à l'approche systémique : Appréhender la complexité* [Rapport de recherche]. Lyon: Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU).

Morin, E. (1986). *La méthode 3 : La connaissance de la connaissance*. Paris: Le Seuil.

Valéry, P. (1973). *Cahiers*. Paris: Gallimard.

Maturana, H. R. (1988). Ontology of observing: The biological foundations of self-consciousness and of the physical domain of existence. In R. E. Donaldson (Ed.), *Texts in cybernetic theory: An in-depth exploration of the thought of Humberto Maturana, William T. Powers, and Ernst von Glasersfeld* (pp. 1–53). American Society for Cybernetics (ASC).

Le Moigne, J.-L. (2006). *La théorie du système général : Théorie de la modélisation* (4^e éd. mise à jour). Paris : Presses Universitaires de France.

Nakajima, T. (2004). Synchronic and diachronic hierarchies of living systems. *International Journal of General Systems*, 33(5), 505–526. <https://doi.org/10.1080/0308107042000193525>

Pumain, D. (2006b). Systèmes de villes et niveaux d'organisation. In P. Bourguin & A. Lesne (Eds.), *Morphogenèse. L'origine des formes* (pp. 239–263). Paris: Belin.

Oliveira, V. (2016). The study of urban form: Different approaches. In *Urban morphology: An introduction to the study of the physical form of cities* (pp. 87–149). Cham: Springer.

Batty, M. (2007). Model cities. *Town Planning Review*, 78(2), 125–151. <https://doi.org/10.3828/tpr.78.2.3>

Schmitt, G. (2013). Spatial modeling issues in future smart cities. *Geo-Spatial Information Science*, 16(1), 7–12. <https://doi.org/10.1080/10095020.2013.774107>

Haggett, P. (1965). *Locational analysis in human geography*. Edward Arnold.

Lévy, J., & Lussault, M. (Eds.). (2003). *Dictionnaire de la géographie*. Paris: Belin.

Banos, A. (2013). *Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en géographie et SHS* [Habilitation à diriger des recherches, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne].

Pumain, D. (1997). Pour une théorie évolutive des villes. *L'Espace géographique*, 26(2), 119–134. <https://doi.org/10.3406/spgeo.1997.1063>

Strang, G. (2009). *Introduction to linear algebra* (4th ed.) [eBook edition]. Wellesley-Cambridge Press.

West, G. (2017). *Scale: The universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies* [Ebook edition]. Penguin Press.

Batty, M., et Longley, P. (1994). *Fractal cities: A geometry of form and function* [eBook edition]. Academic Press.

Batty, M. (2005). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.

Frankhauser, P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Paris : Anthropos (collection « Villes »).

- Pumain, D. (1998). Urban research and complexity. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 323–337). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_10.
- Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude : Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste* [Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d'Azur, Nice].
- Christaller, W. (1966). *Central places in southern Germany* (C. W. Baskin, Trans.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. (Œuvre originale publiée en 1933 sous le titre *Die zentralen Orte in Süddeutschland*).
- Reilly, W. J. (1931). *The law of retail gravitation*. New York: Knickerbocker Press.
- Loos, A. (1908/1998). Ornament and crime. In A. Loos, *Ornament and crime: Selected essays* (pp. 167–176). Riverside, CA: Ariadne Press.
- Le Corbusier. (1994). *Urbanisme*. Paris : Flammarion. (Œuvre originale publiée en 1925, coll. « L'Esprit Nouveau »)
- Le Corbusier. (1971). *La Charte d'Athènes* (Rééd. de l'éd. originale de 1943). Paris : Éditions du Seuil.
- Jacobs, J. (1991). *Déclin et survie des grandes villes américaines* (Trad. de l'anglais). Liège: Mardaga. (Œuvre originale publiée en 1961 sous le titre *The Death and Life of Great American Cities*)
- Alexander, C. (1965). A city is not a tree. *Architectural Forum*, 122(1), 58–62.
- Batty, M. (2013). *The new science of cities* [eBook edition]. Cambridge, MA: MIT Press.
- Wiener, N. (2019). *Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine* [Open Access edition]. Cambridge, MA: MIT Press. (Œuvre originale publiée en 1948).
- Portugali, J. (2000). *Self-Organization and the City* [eBook edition]. Berlin: Springer-Verlag.
- Portugali, J. (2012). Complexity theories of cities: Achievements, criticism and potentials. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), *Complexity theories of cities have come of age* (pp. 47–62). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_4
- Allen, P. M., et Strathern, M. (2008). Complexity: The integrating framework for models of urban and regional systems. In S. Albeverio, D. Andrey, P. Giordano & A. Vancheri (Eds.), *The Dynamics of Complex Urban Systems* (pp. 21–41). Heidelberg: Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1937-3_2.
- Allen, P. M. (2005). *Cities and regions as self-organizing systems: Models of complexity* (eBook ed.). Taylor & Francis e-Library.
- Alexander, C., Ishikawa, S., & Silverstein, M. (1977). *A Pattern Language: Towns, buildings, construction*. New York, NY: Oxford University Press.
- Boeing, G. (2019). Urban spatial order: street network orientation, configuration, and entropy. *Applied Network Science*, 4(1), 67. <https://doi.org/10.1007/s41109-019-0189-1>.
- Chen, Y., et Huang, L. (2018). *Spatial measures of urban systems: From entropy to fractal dimension*. *Entropy*, 20(12), 991. <https://doi.org/10.3390/e20120991>.
- Salingaros, N. A. (2005). *Principles of urban structure*. Amsterdam : Techne Press.
- Wilson, A. G. (2024). *Complex spatial systems: The modelling foundations of urban and regional analysis* [eBook edition]. Routledge.

- Boeing, G. (2018). Measuring the complexity of urban form and design. *Urban Design International*, 23(4), 281–292. <https://doi.org/10.1057/s41289-018-0072-1>.
- Dauphiné, A. (2011). *Géographie fractale : Fractals auto-similaire et auto-affine*. Paris : Hermès-Lavoisier.
- Bretagnolle, A., Daudé, É., & Pumain, D. (2006). From theory to modelling: Urban systems as complex systems. *Cybergeo: European Journal of Geography*, Dossier 335, 1–17. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.2420>.
- Torrens, P. M. (2000). How cellular models of urban systems work (CASA Working Paper No. 28). Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London.
- Plazanet, C., & Berger, P. (2008). *Morphogenèse de la métropole : Rapport final* (Projet de recherche interdisciplinaire EPFL / VPAA / Fonds 590612). Lausanne, Suisse : EPFL, Laboratoire UTA.
- Silva, V. (2010). *Conception et évaluation d'un prototype de simulation de la morphogenèse urbaine par agents vecteurs multi-échelles* [Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Laboratoire de systèmes d'informations géographiques]. Lausanne, Suisse : EPFL.
- Park, J.-J. (2010). *Morphogenèse de la ville contemporaine : Essai sur la multi-échelle* [Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Laboratoire de systèmes d'informations géographiques]. Lausanne, Suisse : EPFL.
- Dauphiné, A. (2003). *Les théories de la complexité chez les géographes*. Paris : Anthropos (Économica).
- Le Moigne, J.-L. (1990). *La modélisation des systèmes complexes*. Paris : Dunod.
- Holland, J. H. (2023). *Emergence: From chaos to order* [eBook]. Oxford University Press.
- Frigg, R., et Hartmann, S. (2020). “Models in Science.” In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2020 Edition).
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour* [eBook]. Oxford University Press.
- Timmermans, H. (2012). On the simplicity of complexity theory in artificial environments. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), *Complexity theories of cities have come of age* (pp. 175–189). Berlin/Heidelberg, Allemagne : Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_10.
- Batty, M., & Marshall, S. (2012). The origins of complexity theory in cities and planning. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), *Complexity theories of cities have come of age* (pp. 21–45). Berlin, Germany : Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_3.
- Gurr, J. M. (2014). ‘Urban Complexity’ from a Literary and Cultural Studies Perspective: Key Cultural Dimensions and the Challenges of ‘Modeling’. In C. Walloth, J. M. Gurr, & J. A. Schmidt (Eds.), *Understanding Complex Urban Systems: Multidisciplinary Approaches to Modeling* (pp. 133–150). Berlin/Heidelberg, Germany : Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_10.
- Douady, S. (2014). Une modélisation de la morphogenèse urbaine ? In C.-N. Douady & Morphocité (Éds.), *De la trace à la trame : La voie, lecture du développement urbain* (pp. 147–150). Paris, France : L’Harmattan.
- Lesne, A., & Bourguine, P. (2006). Introduction. In P. Bourguine & A. Lesne (Eds.), *Morphogenèse : L'origine des formes* (pp. 13–26). Paris : Éditions Belin.
- Morin, E. (2005). *Introduction à la pensée complexe*. Paris : Points-Essais.
- Donnadieu, G., et Karsky, M. (2002). *Penser la complexité : Modéliser pour comprendre*. Paris : L’Harmattan.

- Benenson, I., et Torrens, P. M. (2004). *Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena* [eBook edition]. Wiley.
- Wohl, S. (2020). *Complex adaptive systems & urban morphogenesis: Analyzing and designing urban fabric informed by CAS dynamics* [Thèse de doctorat, Université de Technologie de Delft]. TU Delft Open.
- Mazzocchi, F. (2016). Complexity, network theory, and the epistemological issue. *Kybernetes*, 45(7), 1158–1170. <https://doi.org/10.1108/K-10-2015-0252>.
- El Gouj, H., Rincón-Acosta, C., & Lagesse, C. (2022). Urban morphogenesis analysis based on geohistorical road data. *Applied Network Science*, 7(1), Article 6. <https://doi.org/10.1007/s41109-021-00440-0>.
- Neal, Z. P. (2013). *How networks are shaping the modern metropolis* [Ebook edition]. Routledge.
- Dupuy, G. (1991). *L'urbanisme des réseaux: Théories et méthodes*. Paris: Armand Colin.
- Boeing, G. (2017a). *Methods and measures for analyzing complex street networks and urban form* [thèse de doctorat, université de Californie, Berkeley]. ProQuest Dissertations Publishing.
- _____ (2017b). OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 126–139. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>.
- Newman, M. E. J. (2010). *Networks: An introduction* (eBook ed.). Oxford University Press.
- Barabási, A.-L. (2016). *Network science* (eBook ed.). Cambridge University Press.
- Lagesse, C. (2015). *Lire les lignes de la ville : Méthodologie de caractérisation des graphes spatiaux* [Thèse de doctorat, Université Paris Diderot – Paris VII]. HAL. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01245898>.
- Marshall, S., Gil, J., Kropf, K., Tomko, M., & Figueiredo, L. (2018). Street network studies: From networks to models and their representations. *Networks and Spatial Economics*, 18(3), 735–749. <https://doi.org/10.1007/s11067-018-9427-9>.
- Sayama, H. (2015). *Introduction to the modeling and analysis of complex systems* (eBook ed.). Open SUNY Textbooks.
- Holme, P. (2015). Modern temporal network theory: A colloquium. *European Physical Journal B*, 88(234). <https://doi.org/10.1140/epjb/e2015-60657-4>.
- Buhl, C., Gautrais, J., Solé, R. V., Kuntz, P., Valverde, S., Deneubourg, J. L., & Theraulaz, G. (2004). Efficiency and robustness in ant networks of galleries. *European Physical Journal B*, 42(1), 123–129. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2004-00364-9>.
- Barthelemy, M. (2018). *Morphogenesis of spatial networks* (eBook ed.). Springer.
- Watts, D. J., et Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 393(6684), 440–442. <https://doi.org/10.1038/30918>.
- Barabási, A.-L., & Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286(5439), 509–512. <https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509>.
- Jiang, B. (2015). A city is a complex network. In M. W. Mehauffy (Ed.), *Christopher Alexander: A city is not a tree: 50th anniversary edition* (pp. 89–100). Portland, OR: Sustasis Press.
- Jiang, B. (2016). A complex-network perspective on Alexander's wholeness. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 463, 475–484. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.07.038>.

- Jiang, B. (2007). A topological pattern of urban street networks: Universality and peculiarity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 384(2), 647–655. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.05.064>
- Batty, M. (2004). *A new theory of space syntax* (CASA Working Papers). Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London.
- Agryzkov, T., Oliver, J. L., Tortosa, L., & Vicent, J. F. (2017). *Different types of graphs to model a city* (WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 118, pp. 71–82). WIT Press. <https://doi.org/10.2495/CMEM170081>
- Hamaina, R., Leduc, T., & Moreau, G. (2012). Caractérisation des tissus urbains à partir de l'analyse structurelle des réseaux viaires. *Cybergeo: European Journal of Geography*, (581). <https://doi.org/10.4000/cybergeo.25009>.
- Jiang, B., et Claramunt, C. (2004). Topological analysis of urban street networks. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 151–162. <https://doi.org/10.1068/b306>.
- Porta, S., Crucitti, P., & Latora, V. (2006). The network analysis of urban streets: A primal approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33(5), 705–725. <https://doi.org/10.1068/b32045>.
- Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E*, 73(3), 036125. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.036125>.
- Sevtsuk, A. (2018). *Analysis and planning of urban networks*. In R. Alhajj & J. Rokne (Eds.), *Encyclopedia of social network analysis and mining* (pp. 1–12). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7163-9_43-1.
- Georgiev, P. (2015). *NetworkX: Network analysis with Python* [Tutoriel]. Laboratoire d'informatique, Université de Cambridge. https://www.cl.cam.ac.uk/teaching/1415/L109/1109-tutorial_2015.pdf.
- Fleischmann, M. (2019). *momepy: Urban morphology measuring toolkit*. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1807. <https://doi.org/10.21105/joss.01807>.
- Strano, E., Viana, M. P., Cardillo, A., & Latora, V. (2013). Urban street networks: A comparative analysis of ten European cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40(6), 1071–1086. <https://doi.org/10.1068/b38216>.
- Akbarzadeh, M., Memarmontazerin, S., & Soleimani, S. (2018). Where to look for power laws in urban road networks? *Applied Network Science*, 3(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s41109-018-0060-9>.
- Rauber, A., & Krafta, R. (2018). Alexander's theories applied to urban design. *Urban Science*, 2(3), 86. <https://doi.org/10.3390/urbansci2030086>.
- Ma, D., Guo, R., Zheng, Y., Zhao, Z., He, F., & Zhu, W. (2020). Understanding Chinese urban form: The universal fractal pattern of street networks over 298 cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 192. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040192>.
- Clauset, A., Shalizi, C. R., & Newman, M. E. J. (2009). Power-law distributions in empirical data. *SIAM Review*, 51(4), 661–703. <https://doi.org/10.1137/070710111>.
- Ferrari, E., et Rae, A. (2019). *GIS for planning and the built environment: An introduction to spatial analysis* (1^e éd., e-book). Bloomsbury Academic.
- McHaffie, P., Hwang, S., & Follett, C. (2019). *GIS: An introduction to mapping technologies* (1^e éd., e-book). CRC Press / Taylor & Francis Group.

Chapitre 8 : Invariance d'échelle du réseau viaire traditionnel, propriété morphogénétique de la complexité

« La beauté d'un lieu provient de la présence de formes vivantes, qui sont en réalité souvent des structures fractales cachées. Ces formes nourrissent notre perception à toutes les échelles. »
Christopher Alexander

« L'architecture traditionnelle utilise intuitivement des structures fractales, car elles correspondent aux modèles de perception humaine profondément enracinés dans notre biologie...La ville vivante est une structure fractale : elle se répète à différentes échelles, du quartier à la maison, du jardin au détail de la façade. Cette autosimilarité crée une harmonie que les structures modernistes peinent à retrouver. »
Nikos Salingaros

. Introduction

L'organisation spatiale des villes traditionnelles d'Algérie se caractérise par des tissus viaires complexes, apparemment irréguliers, mais porteurs d'une logique interne (chapitre 4). Comme cela a été montré dans les chapitres précédents, et notamment dans l'analyse de la morphogenèse urbaine (chapitre 2) et de la ville comme système complexe (chapitre 3), ces formes ne sont nullement le produit du hasard : elles résultent d'un processus incrémental, fondé sur des décisions locales et une régulation communautaire, qui ont progressivement façonné des réseaux adaptés aux usages sociaux, culturels et environnementaux. Comprendre cette logique suppose de dépasser une lecture descriptive de l'irrégularité pour l'inscrire dans le cadre théorique plus large de la complexité, et de la morphogenèse. Dans cette perspective, l'hypothèse centrale de cette recherche postule que le modèle fractal constitue un cadre pertinent pour comprendre la morphogenèse de la ville islamique traditionnelle. Comme exposé au chapitre 6, les fractales offrent un modèle formel permettant de saisir l'autosimilarité, la hiérarchie d'échelles et les régularités cachées derrière l'irrégularité apparente. Toutefois, cette hypothèse doit être mise à l'épreuve par des outils empiriques. C'est pourquoi, dans la continuité du chapitre 7, ce travail mobilise la théorie des réseaux comme méthode de validation, afin de tester la présence d'invariances et de structures hiérarchiques au sein des réseaux viaires.

La notion d'invariance d'échelle, issue des théories de la complexité, constitue à cet égard un concept opératoire central. Elle désigne le fait que certaines propriétés statistiques d'un système se maintiennent à travers différentes échelles d'observation, souvent sous la forme de lois de puissance et de distributions à queue lourde. Appliquée au domaine urbain, cette approche permet de mettre en évidence l'existence de régularités profondes derrière la diversité morphologique apparente et de relier les processus locaux de croissance à des structures globales stables. Le présent chapitre examine cette hypothèse en étudiant l'invariance d'échelle des réseaux viaires dans un ensemble de villes traditionnelles algériennes. Quatre cas ont été retenus pour leur représentativité et leur diversité : la Casbah d'Alger, la médina de Tlemcen, le ksar de Ghardaïa et le ksar d'Ouargla. Ces tissus urbains, issus de fondations et de contextes géographiques variés, offrent un terrain d'analyse privilégié pour interroger la présence de structures invariantes dans des morphologies apparemment hétérogènes.

L'étude mobilise des outils issus de la théorie des réseaux et de la géométrie fractale, en particulier l'analyse des centralités et l'examen de leur distribution selon des lois de

puissance. En combinant données et méthodes quantitatives récentes de détection de l'invariance d'échelle, il s'agit de vérifier si le réseau viaire de ces villes peut être qualifié de fractal au sens statistique, et donc de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse d'une morphogenèse auto-organisée inscrite dans le cadre de la théorie de la complexité.

1. Théories de la complexité et fractalité des structures urbaines

La fin du XX^e siècle marque un changement des idées formelles sur la ville en général. La pensée déterministe cède progressivement la place à des approches plus systémiques, ouvrant la voie au nouveau paradigme de la complexité (Batty, 2013, p. 28). La complexité peut être résumée par le credo selon lequel « *le tout est plus grand que la somme des parties* » (Jiang, 2015). Balmaceda et Fuentes (2016) définissent un système complexe comme un ensemble d'entités, ou agents, en interaction dynamique entre elles et avec leur environnement, selon des règles simples. Ce type de système présente des propriétés spécifiques, notamment l'émergence de comportements collectifs difficiles à prédire et non régis par un contrôleur central, autrement dit un fonctionnement autoorganisé. Dans une perspective transdisciplinaire, les théories de la complexité montrent que les villes partagent de nombreuses caractéristiques avec les systèmes complexes. Ainsi, plusieurs modèles développés pour analyser ces derniers peuvent être appliqués au domaine urbain, mettant en lumière différents aspects de la complexité des structures et des dynamiques urbaines (Portugali, 2012, p. 47-62). La forme de la ville est alors comprise comme un « *pattern* » ou modèle spatial émergent, résultant des interactions entre les composantes du système dans un espace donné. Les éléments microscopiques ne portent pas en eux-mêmes la forme urbaine : c'est uniquement par leurs interactions et leur dynamique que surgissent des structures macroscopiques et parfois méso scopiques. Cette conception accorde une place centrale à l'étude des processus de morphogenèse (Fusco, 2018, p. 74).

Parallèlement, la géométrie fractale constitue un outil puissant pour l'étude des systèmes complexes, elle est une grammaire de la morphogenèse (Basili, 1998). Auparavant, Mandelbrot (1982, p. 1-4) a défini les fractales comme des objets dont la forme spatiale est irrégulière et dont l'irrégularité se répète à de multiples échelles. Selon Dauphiné (2011, p. 13), les fractales se caractérisent principalement par trois propriétés : l'autosimilarité, l'invariance d'échelle et la dimension fractale. Premièrement, l'autosimilarité, de nature géométrique, désigne le fait qu'un objet est composé de parties qui sont des copies, exactes ou approximatives, de l'objet lui-même. Le tout est ainsi semblable à ses parties, lesquelles peuvent à leur tour être décomposées en sous-parties identiques. Deuxièmement, l'invariance d'échelle, de nature statistique, signifie qu'un même caractère se retrouve à toutes les échelles d'observation. Enfin, la dimension fractale constitue un indicateur quantifiant l'irrégularité d'une forme et mesurant la variation d'information lors du passage d'une échelle à une autre. L'application des concepts fractals aux structures urbaines ne se limite pas à une meilleure description morphologique : elle contribue également à en comprendre la genèse (Pumain, 1998). En tant que système complexe, la ville est un organisme en constante évolution, transformé par des règles et conditions locales qui produisent, par agrégation, un ordre global perceptible à travers de nombreuses échelles spatiales et temporelles (Allen, 2005, p. 2-3). Ainsi, envisager la formation fractale de la ville revient à rompre avec la tradition fondée sur la géométrie euclidienne, qui conçoit l'espace urbain comme régulier, simple et ordonné. Cette approche euclidienne, limitée à une description globale de la morphologie et à la disposition des éléments constitutifs, peine à rendre compte des processus dynamiques sous-jacents responsables de l'organisation et de la génération de la forme urbaine (Batty & Longley, 1994, p. 10).

Le changement de paradigme qui a marqué les sciences urbaines à la fin du XX^e siècle toucha aussi l'étude de la ville islamique traditionnelle. Celle-ci n'est plus présentée comme un objet figé ou comme un vestige d'un passé médiéval, mais comme un environnement dynamique, en constante transformation, évoluant à travers différentes échelles spatiales et temporelles, et structuré par l'action de multiples acteurs sociaux, culturels et économiques (Akbar, 2021). Ces nouvelles approches mettent en avant la dimension processuelle de la ville islamique, en la considérant non pas comme un produit achevé, mais comme le résultat d'interactions continues entre habitants, institutions et contexte environnemental. Elles se révèlent ainsi pleinement compatibles avec les théories de la complexité et leurs modèles, qui privilégient l'analyse de l'auto-organisation, de l'émergence et des dynamiques évolutives (Ben Hamouche, 2009 ; 2011). Cette réorientation s'inscrit dans un mouvement plus large de remise en cause de l'orientalisme et de ses représentations négatives. Pendant longtemps, l'approche orientaliste a dominé les discours académiques, en interprétant la morphologie urbaine islamique à travers une comparaison systématique et hiérarchisée avec la grille orthogonale gréco-romaine, considérée comme rationnelle et universelle. Dans ce cadre, le réseau viaire islamique, souvent qualifié d'irrégulier, fut réduit à une forme d'urbanisme supposée ambiguë, irrationnelle et spontanée, décrite comme l'héritage d'un long Moyen Âge et comme la preuve d'un retard civilisationnel (Raymond, 2008). Cette vision réductrice ne cherchait pas à comprendre la logique interne des formes urbaines, mais à les juger à travers un modèle externe, eurocentré et normatif. Ainsi, l'apport des théories de la complexité peut offrir une alternative scientifique et conceptuelle aux lectures orientalistes. Là où l'orientalisme ne voyait que désordre et incohérence, la complexité révèle des structures sous-jacentes et des logiques qui permettent d'expliquer la genèse et l'évolution des tissus urbains islamiques. Cette perspective ouvre la voie à une relecture conceptuelle et méthodologique de la ville islamique, non plus comme un autre négatif de la ville occidentale, mais comme un champ fertile pour l'étude de la morphogenèse urbaine.

2. Processus de formation et modèle fractal

Comme décrit en détail dans le chapitre 4, les villes islamiques traditionnelles se caractérisent par le tissu irrégulier compact, les habitations ouvertes sur des cours intérieurs et les constructions de faible hauteur, imbriquées les unes aux autres. Le tout façonné par des rues sinueuses et des ruelles en cul-de-sac. (Al-Hathloul, 1981 ; Mortada, 2003). Ces villes ont suivi un modèle de croissance organique, marqué par une hiérarchie forte et la présence d'archétype de forme bâtie (voir figure 8.1). (Bianca 2000, p.141). Selon Batty et Longley (1994, p.28), les villes organiques qui ne présentent pas de signes évidents que leur géométrie était planifiée dans l'ensemble, peuvent être le produit de nombreuses décisions détaillées individuelles et coordonnées dans l'ensemble. Pourquoi, il est inutile de penser que ces villes sont non planifiées par opposition à celles planifiées, car cela exprime une lecture superficielle de la forme urbaine.

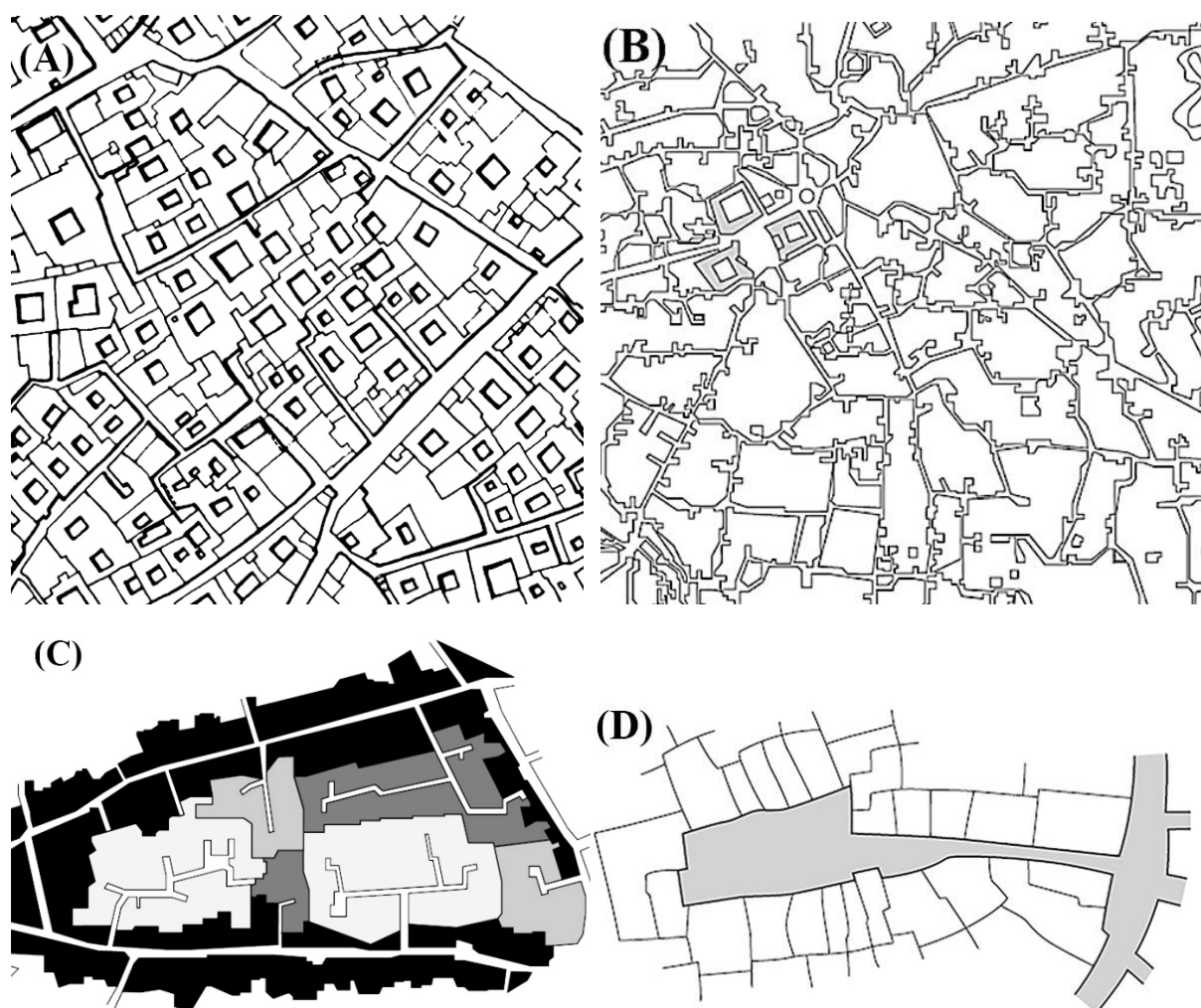


Figure 8.1. Différentes couches structurelles dans la ville islamique : (A) L'environnement bâti, composé de maisons individuelles similaires avec des cours intérieures ; (B) et (C) Le réseau viaire aux niveaux urbain et individuel ; (D) Rue en cul-de-sac au niveau du quartier. Source : Mortada (2003)

Selon (Bölen et Kaya, 2017), dans les villes qui suivent une croissance organique, le processus de formation d'une structure non planifiée nécessite plus de temps mais crée des modèles urbains plus complexes. La structure spatiale complexe du modèle urbain est régie par des forces à la fois locales et globales. La ville islamique est un exemple significatif de cette logique. La figure 8.2 illustre ce processus. Par conséquent, sa formation peut être décrite comme le résultat d'une interaction entre deux systèmes de prise de décision simultanés, encadrés par les règles juridiques islamiques (Brunschvig, 1947 ; Al-Hathloul, 1981 ; Akbar, 2021 ; Hakim, 2008 ; Mortada, 2003 ; Ben Hamouche, 2010). Les décisions publiques à l'échelle macro (urbaine) représentent l'autorité publique, tandis que les décisions privées à l'échelle micro (quartier) représentent les habitants. En conséquence, les institutions de l'inspection « *Hisba* » et les juristes servaient de régulateurs entre les deux (Ben Hamouche, 2003). La « *Hisba* » est le terme utilisé par les juristes islamiques classiques pour décrire la fonction de régulation de l'espace public qui doit être exercée par l'autorité islamique, souvent appelée le « *Muhtasib* » dans ce sens (Stilt et Saraçoğlu, 2018).

En effet, au niveau urbain macro, le tracé du réseau viaire suivait les orientations de l'autorité publique (AlSayyad, 1991, p.92). Par contre à l'intérieur des ilots résidentiels, la subdivision et la construction se faisaient par les habitants (Hakim, 1986, p.18-19). A cet échelle, Bianca (2000, p.153) décrit le processus : « *au niveau hiérarchique respectif, chaque unité résidentielle disposait de son propre système de circulation, les sections et ramifications individuelles étant séparées et reliées par des portes intérieures préservant l'intégrité territoriale des différentes communautés. L'union des unités n'était pas une simple juxtaposition, mais impliquait une assimilation structurelle qui, étape par étape, absorbait et incorporait des blocs de construction entiers dans un système urbain plus vaste. Ce processus d'intégration progressive se répétait dans différentes tailles et à différents niveaux hiérarchiques* ».

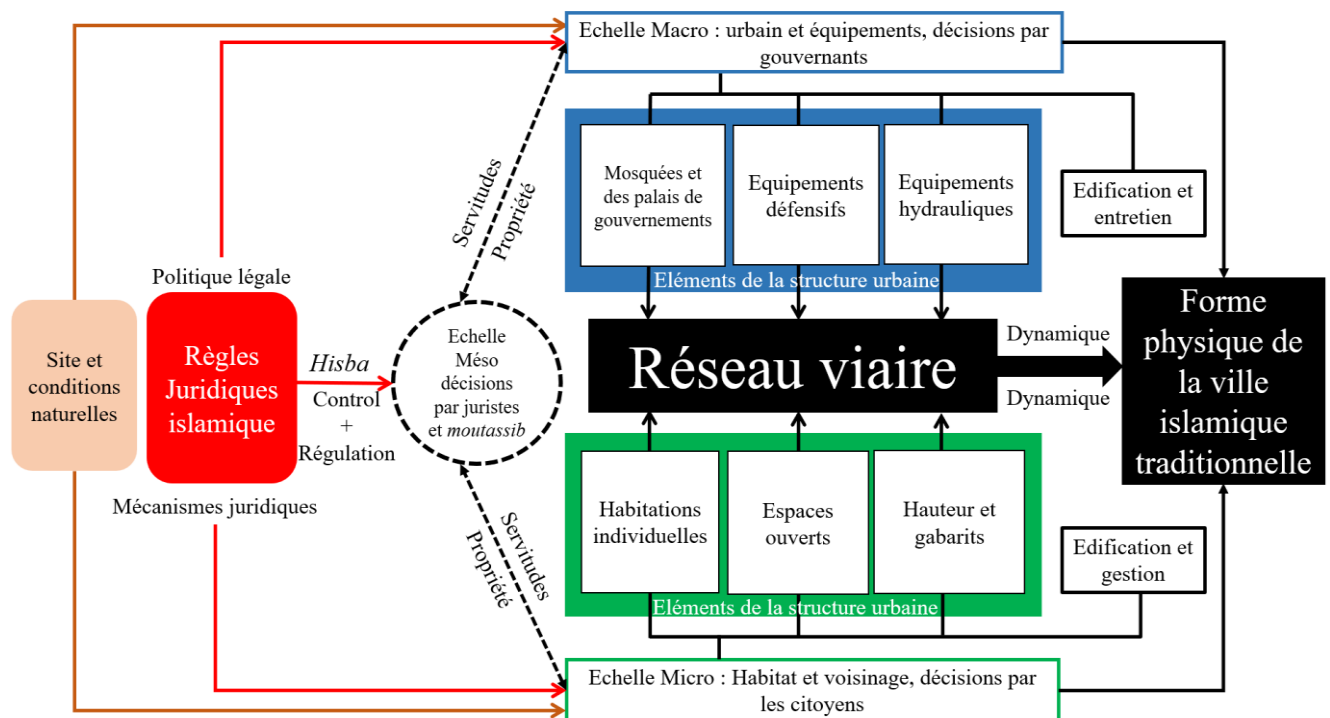


Figure 8.2. Modèle conceptuel expliquant la formation de la ville islamique traditionnelle. Source : auteur

En même temps, Petruccioli (1999 ; 2002 ; 2007) confirme que les approches de recherche en développement démontrent que les villes islamiques ne sont pas irrégulières. Au contraire, elles révèlent des fragments d'une géométrie régulière sous l'apparence d'un plan irrégulier. Des études de cas montrent que ces fragments sont soit la preuve de phases planifiées, soit un tissu classique préexistant qui a été systématiquement absorbé. La ville islamique s'est développée lentement en métabolisant et en transformant le tissu de manière continue et sans ruptures. Des villes telles que Damas, héritée des Romains, et Koufa, nouvellement fondée par les musulmans, présentent un modèle qui démontre la mutation du réseau viaire (voir figure 8.3). Initialement, un réseau régulier et polycentrique, composé de rues ramifiées, a ensuite évolué par l'action publique et privée vers un tissu irrégulier (Al-Hathloul, 1981 ; Mortada, 2003). Selon (Akbar, 1984) (citant Al Janabi), la formation du réseau viaire à Koufa a traversé quatre étapes principales : premièrement, les rues principales ont été tracées et devaient mesurer 40 coudées de long (une coudée est une ancienne unité de

mesure, équivalant à 457 mm basée sur la longueur du bras (Britannica, 2024)), celles suivant les rues principales 30 coudées, celles entre elles 20 coudées. Enfin, les ruelles avaient 7 coudées de large.

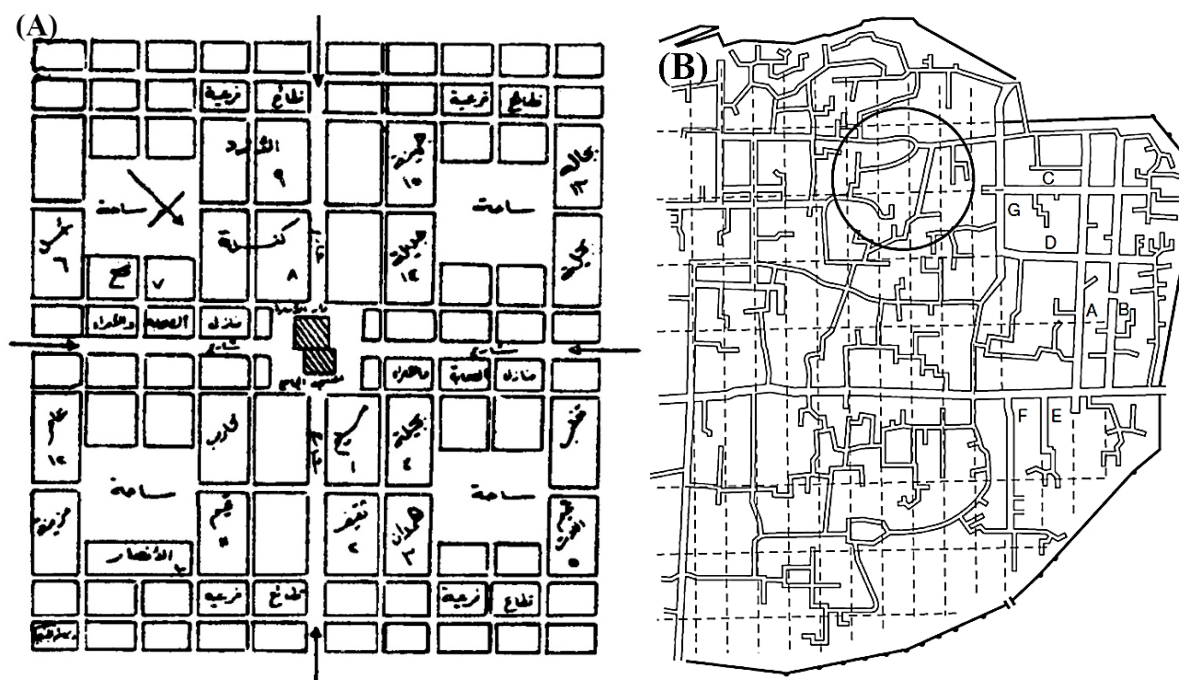


Figure 8.3. Fondation et genèse de la ville islamique traditionnelle : (A) Koufa telle que proposée par Al Janabi. Source : Akbar, 1984 ; (B) Damas, avec son plan islamique irrégulier superposé au plan orthogonal romain sous-jacent. Source : Mortada (2003).

Le processus de formation du réseau viaire peut être comparé à un modèle fractal génératif. Trois propriétés fractales nous conduisent à cette analogie : l'irrégularité générale, la hiérarchie et, plus particulièrement, l'autosimilarité, une caractéristique observée à différentes échelles tout au long des étapes de formation. Plus précisément, l'autosimilarité se rapporte à l'établissement identique des rues suivant une gradation hiérarchique de quatre niveaux, allant des artères principales aux rues étroites. S'appuyant sur cette base, et établissant une analogie avec l'ensemble de Cantor, (Ben Hamouche, 2009) propose un modèle fractal itératif présenté dans les figures 8.4 et 8.5. D'un point de vue fractal, un ensemble de Cantor est un objet représenté par une ligne qui est divisée en deux ; cette division est récursive, où chaque nouvelle ligne est divisée à nouveau en deux (Holme, 2010, p.439). En conséquence, il présente une autosimilarité. Initialement, (Eglash, 1999, p.199-202) développe une approche similaire, dans laquelle les rues principales initialement tracées sont considérées comme des lignes actives (voir figure 8.6). Par la suite, par des étapes itératives, elles se transforment en lignes passives. Après la huitième itération, l'autosimilarité commence à être observée. Pour être qualifiée de fractale, une ville doit présenter les caractéristiques d'une fractale géométrique, principalement : la récursion, l'invariance d'échelle, l'autosimilarité, l'infinité et la dimension fractale (Eglash, 1999, p.20-38).

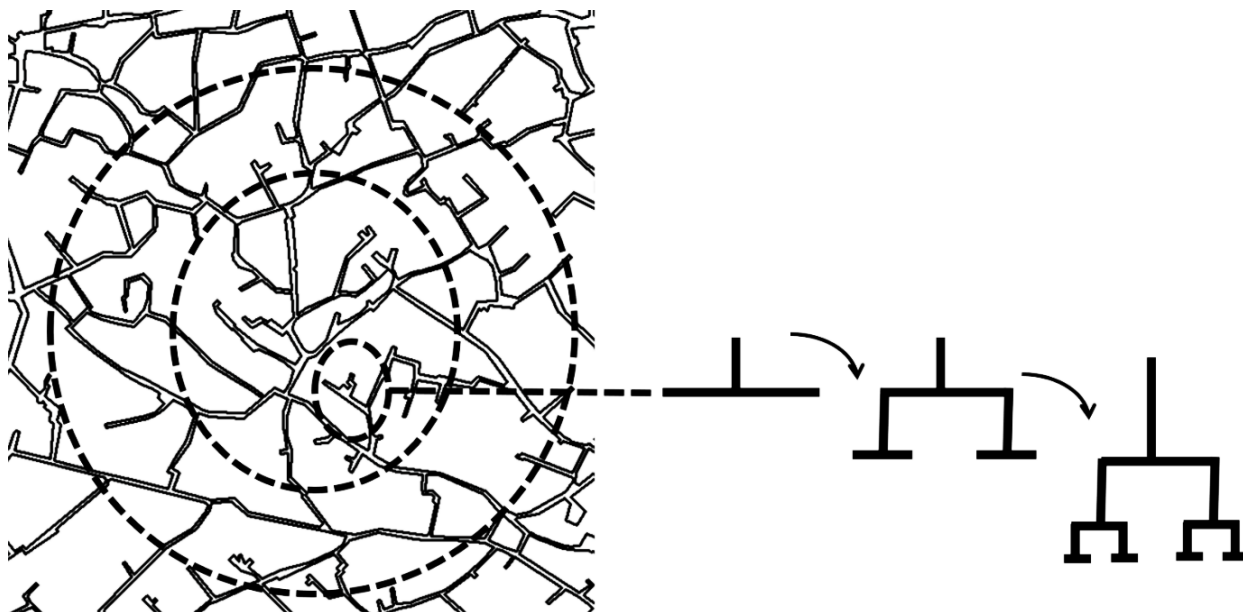


Figure 8.4. Schéma conceptuel d'itération des rues, inspiré de l'analyse de Ben Hamouche (2009) appliquant le modèle fractal de Cantor à un fragment de la casbah d'Alger. Source : auteur.

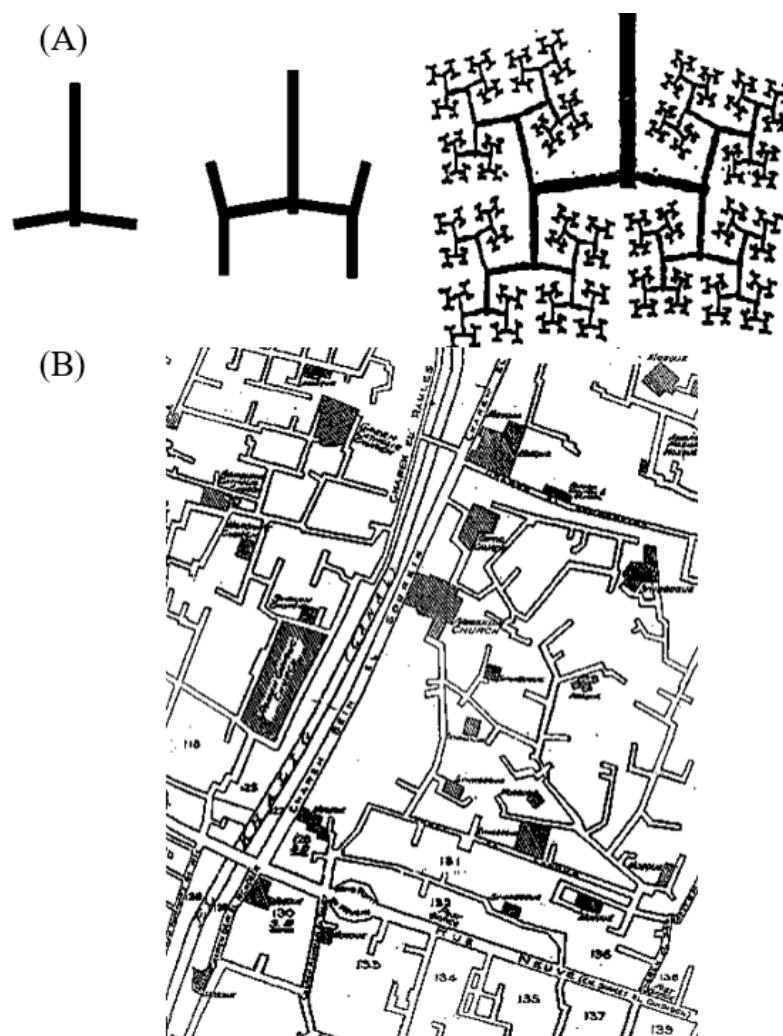


Figure 8.5. Genèse fractale et ramification du réseau viaire : (A) Itération du modèle mathématique théorique ; (B) Fragment du réseau viaire du Caire historique comme exemple correspondant. Source : Eglash (1999).

3. Invariance d'échelle du réseau viaire, cas des villes traditionnelles algériennes

Frankhauser (1994, p. 42) affirme que l'hypothèse de formation fractale basée sur l'autosimilarité du réseau viaire peut être juste théoriquement. Par contre, il est impossible de comparer directement par analogie le processus de morphogenèse urbaine à une fractale géométrique. (Voir figures 8.6 et 8.7). Selon Boeing (2018a) dans le monde réel, les fractales n'existent pas parfaitement à toutes les échelles spatiales, de l'infinitésimal à l'infini, comme le font les fractales mathématiques abstraites. Les fractales présentent des caractères similaires à chaque échelle plutôt qu'une seule échelle. Concrètement, une ville est fractale si ses composants, à l'exemple du réseau viaire, ont tendance à être distribués selon une loi de puissance, c'est-à-dire une distribution invariante d'échelle. Avec peu de grands éléments, un nombre moyen d'éléments de taille moyenne et beaucoup de petits éléments. L'invariance d'échelle est de nature statistique, elle fait référence aux caractéristiques similaires observés dans chaque échelle. C'est une propriété plus générale, elle englobe l'autosimilarité (Dauphiné 2011, p.13-14).

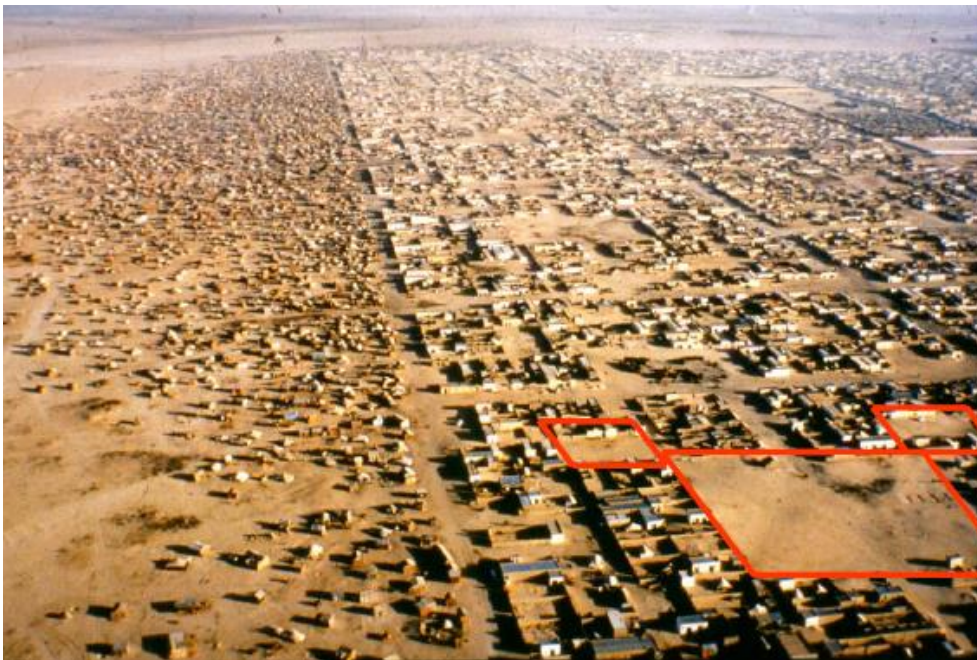


Figure 8.6. Ressemblance du schéma de l'urbanisation de Nouakchott et du tapis de Sierpinski. Source : Frankhauser (1994).

En effet, une distribution en loi de puissance est un type spécifique de distribution de probabilité où la fréquence ou la probabilité d'un événement diminue à mesure que l'ampleur ou la taille de l'événement augmente, suivant une relation de loi de puissance. Cette relation est caractérisée par une longue traîne (queue lourde), ce qui signifie que les événements rares et extrêmes sont plus probables que dans des distributions comme les distributions normale ou exponentielle (Clauset et al., 2009). Mathématiquement, une distribution en loi de puissance peut être décrite par la fonction de densité de probabilité :

$$p(x) \propto x^{-\alpha} \quad (8.1)$$

Où $\alpha > 1$ est l'exposant d'échelle et $x > x_{min} > 0$. En général, l'exposant prend des valeurs comprises entre $2 < \alpha < 3$, et souvent la queue de la distribution suit une loi de puissance, ce qui signifie que la loi de puissance n'est observée qu'au-delà d'une valeur x_{min} .

De même, Salingeros (2005) définit une ville fractale comme une ville invariante d'échelle. Autrement dit, ses éléments morphologiques, des longueurs de rues aux empreintes de bâtiments, suivent une distribution en loi de puissance. Cette définition constitue avant tout un cadre théorique hypothétique. Cependant, de nombreuses études empiriques, mobilisant des modèles fractals et différentes méthodes d'analyse, ont montré que la formation urbaine et la distribution de ses éléments, en particulier le réseau viaire, suivent effectivement des lois de puissance. Par exemple, Kalapala, el al. (2006) examinent la structure des réseaux viaires à travers le prisme de la théorie des systèmes complexes et de la géométrie fractale. En analysant empiriquement les réseaux de rues dans : les États-Unis, l'Angleterre et le Danemark. Ils démontrent que ces réseaux présentent une invariance d'échelle : leurs motifs de connectivité et de hiérarchie se répètent de manière similaire à différentes échelles spatiales. Ils mettent en évidence que plusieurs propriétés topologiques, notamment la distribution des longueurs de segments, suivent une loi de puissance.

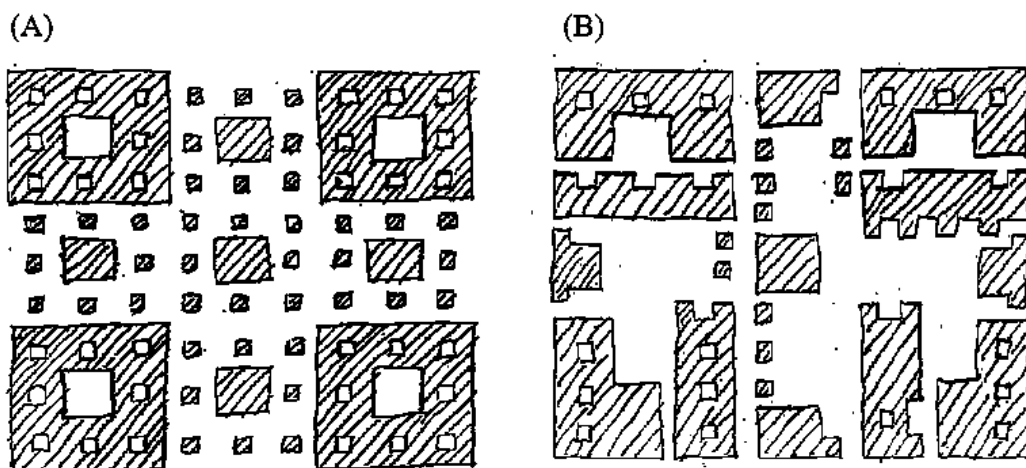


Figure 8.7. Fractalité des structures urbaines : (A) Modèle d'une ville fractale idéale, équivalente à une fractale géométrique. (B) Exemple d'une ville fractale théorique. Source : Salingeros (2005).

Mohajeri et al. (2012) proposent une analyse empirique de la fractalité des réseaux de rues à partir d'un échantillon de villes européennes. En calculant la dimension fractale des tracés viaires, ils mettent en évidence une propriété d'invariance d'échelle : les motifs de rues conservent des caractéristiques structurelles similaires quelle que soit l'échelle d'observation. Cette invariance se traduit par la présence de distributions en loi de puissance, révélant l'autosimilarité statistique et la hiérarchie interne des réseaux. Ils montrent également que cette invariance et ces régularités fractales sont influencées par la forme globale et la compacité des villes, ce qui permet de relier la morphologie urbaine à la complexité interne du réseau viaire. De leur côté, Zhang et Li (2012) examinent la fractalité et l'autosimilarité des réseaux viaires des 50 comtés les plus peuplés des États-Unis. En calculant la dimension fractale structurelle des réseaux viaires, ils confirment l'existence d'une organisation fractale robuste. Leur analyse révèle une nette invariance d'échelle, puisque les motifs topologiques et géométriques des rues se répètent de l'échelle locale à l'échelle régionale, traduisant ainsi une

hiérarchie interne. De plus, la distribution des longueurs et des connexions de rues suit une loi de puissance : quelques artères principales concentrent l'essentiel des connexions, tandis qu'une multitude de rues secondaires, plus petites, assurent la densité du maillage. Ces résultats démontrent que les réseaux viaires urbains obéissent à des régularités statistiques caractéristiques des systèmes complexes autoorganisés.

Récemment, dans la même perspective, Ma et al. (2020), à partir de l'étude de 298 villes chinoises, démontrent que la forme urbaine en Chine suit un patron fractal universel observable dans les réseaux viaires. Leur analyse empirique, fondée sur des données géospatiales à grande échelle, calcule la dimension fractale des tracés de rues et montre que ceux-ci présentent une invariance d'échelle : les motifs d'organisation se répètent de manière similaire à différents niveaux d'observation. Ils mettent également en évidence que la hiérarchisation des rues obéit à une distribution en loi de puissance, confirmant la nature auto-organisée et complexe de ces structures urbaines. L'ampleur et l'homogénéité de l'échantillon étudié permettent de généraliser les résultats et de conclure que les réseaux viaires chinois partagent une régularité fractale stable, indépendamment des différences locales, renforçant ainsi l'idée d'un modèle fractal applicable à la morphogenèse urbaine.

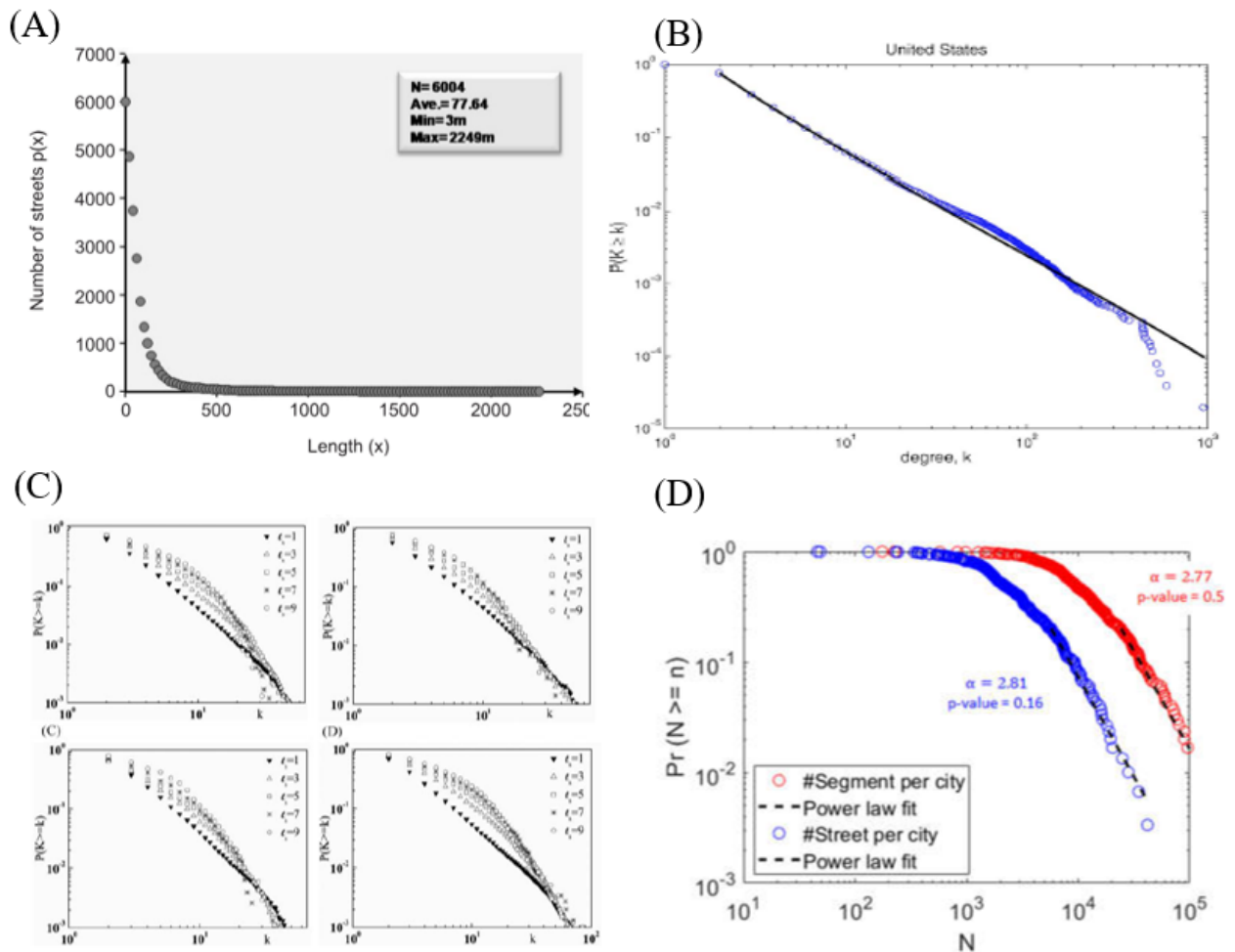


Figure 8.8. Distribution statique des différents réseaux viaires observés : (A) et (B) en Europe ; (C) En Amérique ; (D) En Chine. Source : Kalapala, et al. (2006) ; Mohajeri et al. (2012) ; Zhang et Li (2012) ; Ma et al. (2020).

3.1. Cas d'études, localisation et présentation

Après avoir exploré le passage du concept abstrait de fractale géométrique à l'analyse empirique des réseaux urbains, il apparaît que ces derniers présentent souvent une invariance d'échelle et des distributions en loi de puissance dans divers contextes. Ces observations suggèrent que la morphogenèse urbaine peut être comprise à travers le cadre des modèles fractals, dépassant ainsi les approches purement géométriques ou descriptives. Dans ce contexte, notre étude cherche à déterminer si les villes islamiques traditionnelles en Algérie manifestent des propriétés similaires, permettant d'évaluer la pertinence du modèle fractal dans un environnement historique et culturel spécifique. L'analyse se concentre sur quatre villes représentatives : la Casbah d'Alger, la médina de Tlemcen, le ksar de Ghardaïa et le ksar d'Ouargla (voir figure 8.9 pour leur localisation).

La sélection de cet échantillon repose sur des critères précis : fondation, genèse, évolution urbaine et diversité des régions géographiques de l'Algérie. Chaque ville illustre, par sa morphologie et son organisation, des caractéristiques typiques de la ville islamique traditionnelle. L'intérêt de cette étude est double. D'une part, elle vise à tester la robustesse du modèle fractal et à vérifier si les principes théoriques de l'invariance d'échelle et de la distribution en loi de puissance sont observables dans un contexte urbain spécifique. D'autre part, elle permet d'expérimenter des outils d'analyse capables de quantifier la complexité urbaine. Dans ce qui suit, chaque cas d'étude est décrit en termes de situation géographique, de caractéristiques morphologiques et d'évolution historique jusqu'à l'indépendance. L'objectif n'est pas de produire des monographies urbaines, mais de mettre en évidence les traits structurels essentiels. Cette démarche permet, à travers le modèle fractal et la théorie des réseaux, d'analyser la morphogenèse urbaine de ces villes.

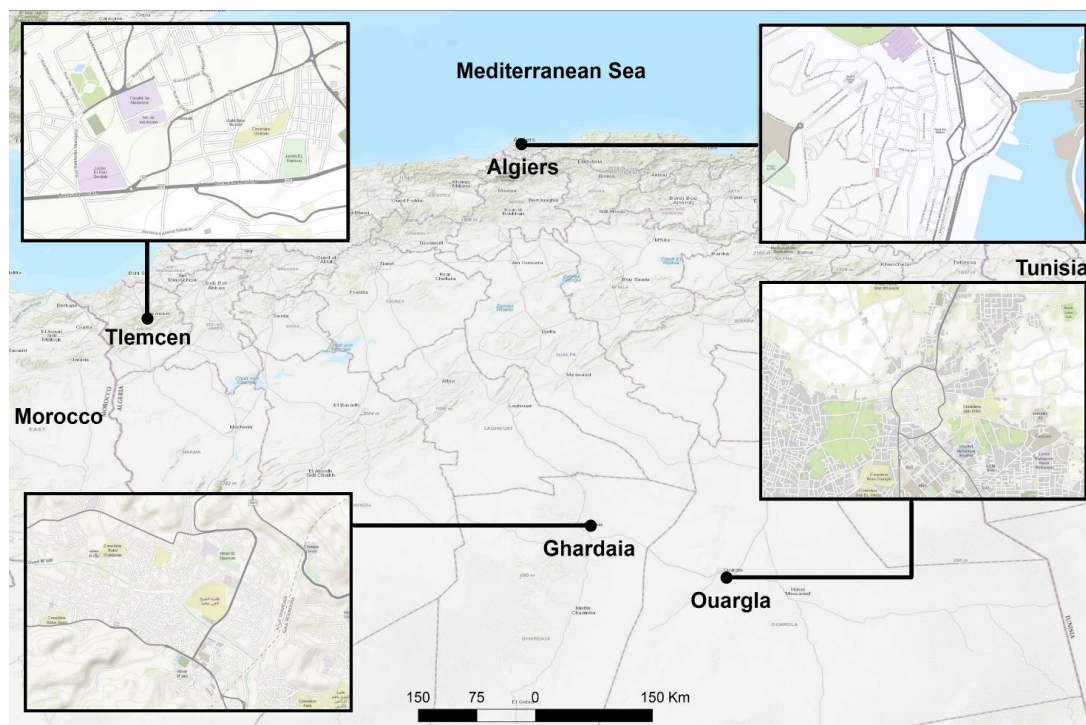


Figure 8.9. Localisation géographique des cas d'étude sélectionnés. Source : auteur.

3.2. Casbah d'Alger

La Casbah d'Alger constitue un cas d'étude central pour analyser la morphogenèse urbaine dans les villes islamiques traditionnelles, en raison de sa morphologie authentique et de son importance historique. Son développement spatial illustre l'interaction entre les contraintes environnementales, les pratiques socio-culturelles et les cadres réglementaires historiques (Ravéreau, 1989). Alger a été fondée par les Phéniciens comme comptoir commercial et port pour leurs navires en 1200 av. J.-C. (Lambert Playfair, 1890, p.21). Avant la présence ottomane, Alger restait une petite ville dotée d'un port modeste, de remparts, d'une citadelle et de quelques bâtiments notables comme la grande mosquée almoravide. La zone urbanisée se trouvait principalement dans la partie haute, avec des espaces non construits à l'intérieur des remparts. (Shuval, 1998, p. 14). La topographie du site a fortement influencé la morphogenèse. La Casbah est implantée sur un amphithéâtre naturel face à la mer, dominée par un relief montagneux culminant à 120 m au niveau de la citadelle (Pasquali 1955). Les lignes de crêtes et les plateaux sommitaux ont structuré l'espace urbain : leurs pentes douces à l'intérieur et abruptes à l'extérieur confèrent une valeur défensive stratégique et conditionnent la répartition des rues et des bâtiments (El-Habib Tahari et Kassab, 2019).

L'évolution urbaine d'Alger connaît une accélération notable avec l'arrivée des Ottomans en 1516, suivie de l'arrivée massive des réfugiés andalous à partir de 1609. Ces événements ont entraîné des transformations profondes dans l'organisation de la ville. Le changement de politique opéré par les autorités ottomanes, combiné à l'augmentation significative de la population, a conduit à une expansion urbaine rapide et à une réorganisation des espaces construits (Cresti, 2005 ; Missoum 2014). Le noyau initial pré-ottoman se composait d'un réseau de rues organique, tandis que les extensions ultérieures se sont développées en anneaux concentriques. La démolition des remparts et la construction d'équipements publics sous les ordres de l'autorité ottomane ont marqué les étapes principales de cette évolution. Le rôle de l'autorité se limitait à préparer le cadre urbain général, c'est-à-dire à tracer les routes publiques ou les voies principales, tandis que le développement à l'intérieur des îlots était assuré par les habitants (Ben Hamouche, 1993). L'organisation de la ville en deux secteurs fonctionnellement différenciés met en évidence une dualité dans le réseau viaire. La partie basse, dédiée aux activités économiques et héritée de l'occupation romaine, se caractérise par un réseau relativement régulier, avec de larges rues publiques. En revanche, la partie haute, résidentielle, présente un réseau organique composé de rues étroites et de voies sans issue, adaptées aux habitations individuelles (Raymond, 1985, p. 172-173).

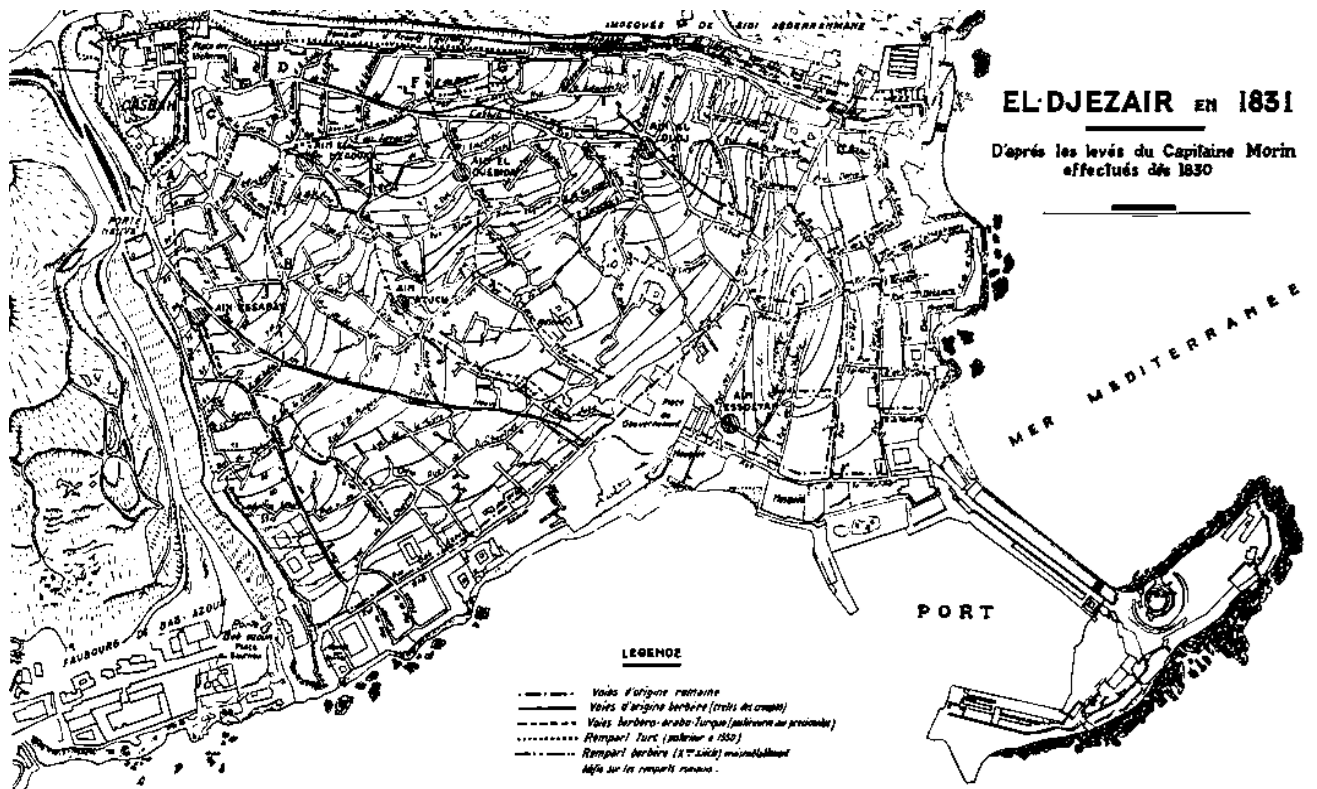


Figure 8.10. Carte de la structure urbaine de la casbah d'Alger en 1831 par le Capitaine Morin. Source : B.N.F



Figure 8.11. Réseau viaire historique de la casbah d'Alger. Source : Atelier casbah (1981).

3.3. Médina de Tlemcen

La ville historique de Tlemcen est située sur un piémont, à environ 600 m d'altitude, adossée au massif de « *Lalla Setti* » et dominant une vaste plaine fertile. Son emplacement stratégique, à l'intersection des routes reliant le Maghreb central au Maghreb extrême (Maroc), en a fait, dès l'Antiquité, un carrefour commercial et culturel important. Tlemcen se trouvait également au cœur des axes caravaniers transsahariens, reliant le Sahara à la Méditerranée, ce qui a renforcé son importance politique et économique. Le climat méditerranéen, tempéré par l'altitude, combiné aux ressources naturelles et à sa position frontalière, a consolidé sa place en tant que centre d'influence. La ville a ainsi joué un rôle charnière entre l'Afrique du Nord et l'Afrique subsaharienne, se distinguant par son rayonnement politique, économique et culturel (Piesse et Canal, 1889, p.24).

L'évolution urbaine de Tlemcen s'inscrit dans une continuité historique riche, façonnée par l'influence successive de plusieurs civilisations. Durant l'époque romaine, la fondation de « *Pomaria* » (201–235 ap. J.-C.) établit les premières structures urbaines, à vocation militaire et agricole (Piesse et Canal, 1889, p. 25). Sous les Idrissides, la ville prend le nom de « *Agadir* », fortifiée et organisée autour de la mosquée et du souk, constituant alors le cœur religieux et commercial de la cité. Les Almoravides enrichissent encore l'urbanisme local en créant le quartier de « *Tagrart* », en dotant la ville de remparts et de nouveaux édifices religieux. Les Almohades poursuivent l'expansion en développant de nouvelles extensions urbaines. Toutefois, c'est sous les Zianides (1236–1517) que Tlemcen connaît son apogée, devenant la capitale du Maghreb central et se parant de monuments prestigieux tels que la Mosquée Sidi Bel Hassan, la Médersa « *Tachfinia* » et le « *Mechouar* ». La période mérinide ajoute également des constructions militaires et religieuses, consolidant le rôle politique et culturel de la ville. À l'époque ottomane, Tlemcen connaît une relative stagnation, tout en conservant l'essentiel de ses structures héritées (Kassab, 2007, p.45-118). La période coloniale française introduit de profonds bouleversements dans l'organisation urbaine, à travers des percements (1842), des plans d'aménagement et la création d'une ville nouvelle européenne, qui marginalise la médina et altère en partie son caractère arabo islamique (Oulebsir, 2004, p. 64- 65).

Le réseau viaire de Tlemcen se caractérise par une structure hiérarchisée et organique, exemple du modèle de la médina islamique. Il s'organise autour de grands axes reliant les portes aux pôles majeurs (mosquées, souks, places publiques), qui constituent l'ossature principale de la circulation. Ces artères débouchent sur un tissu de rues secondaires sinueuses et irrégulières, adaptées à la topographie du piémont, où elles suivent les courbes de niveau. Enfin, les impasses « *derb* », desservant un nombre limité de maisons, traduisent une logique d'intimité résidentielle et de cohésion sociale à l'échelle familiale ou lignagère, réduisant l'accessibilité et renforçant la protection interne (Boukerche, 1989, p. 200-204). Ce système viaire, par sa complexité et sa hiérarchie, illustre une organisation urbaine à la fois sociale, défensive et fonctionnelle, propre aux médinas.

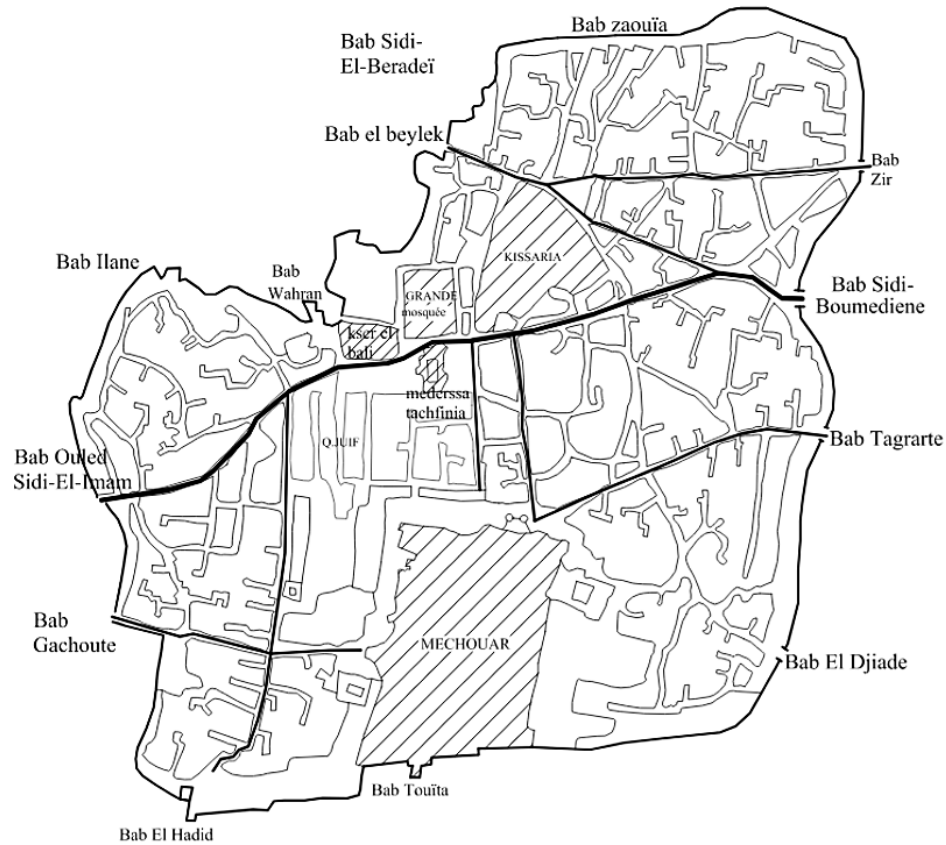


Figure 8.12. Structure urbaine de la médina de à l'aube de l'invasion coloniale française. Source : https://www.academia.edu/4264062/m%C3%A9dina_de_Tlemcen, consulté en Décembre 2024.

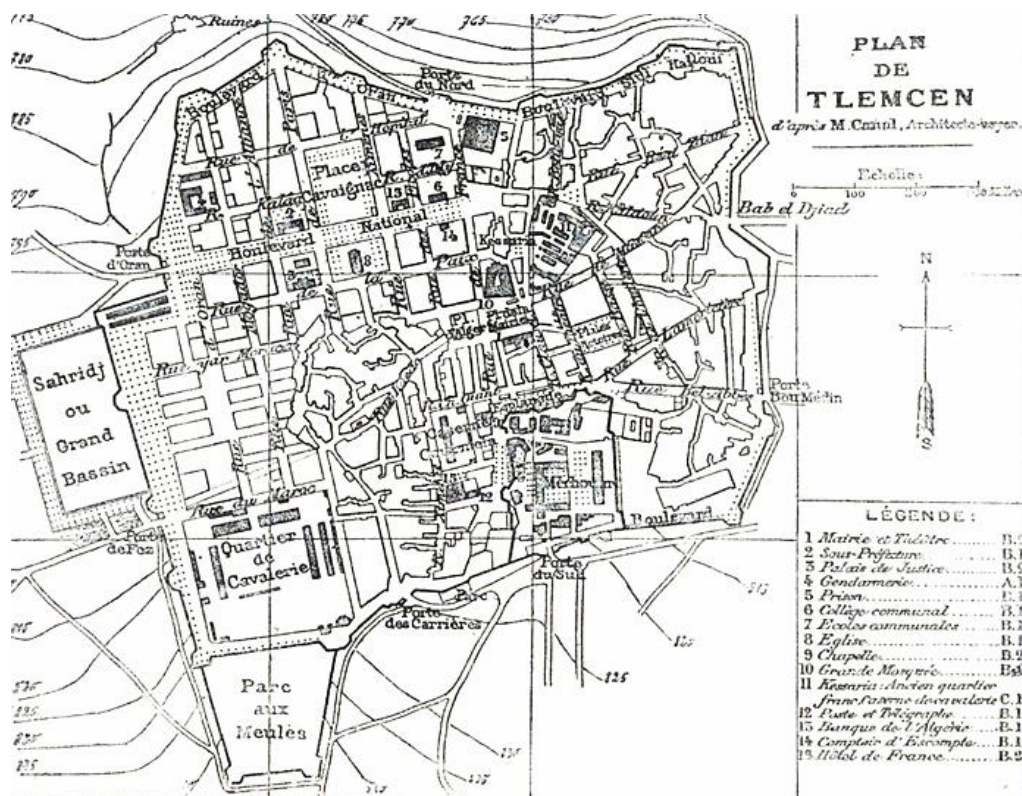


Figure 8.13. Plan de Tlemcen vers 1889 par le Commandant Allard. Source : Piesse et Canal (1889).

3.4. Ksar de Ghardaïa

La vallée du M'Zab est située dans le Sahara septentrional, à environ 600 km au sud d'Alger, dans la wilaya de Ghardaïa. Elle s'étend sur près de 50 km² et regroupe cinq ksour principaux : El Atteuf, Bounoura, Ghardaïa, Beni Isguen et Mélika, implantés le long de l'oued M'Zab. Ces villes fortifiées sont construites sur des éperons rocheux afin d'assurer à la fois une défense optimale et une maîtrise des ressources hydriques. Le site est marqué par un climat aride, de fortes amplitudes thermiques et des précipitations très faibles, ce qui a nécessité une adaptation ingénieuse de l'urbanisme et de l'agriculture, notamment par le système de foggaras et de palmeraies irriguées. L'organisation spatiale ksar-palmeraie-cimetière reflète un équilibre entre contraintes naturelles et besoins socio-culturels, témoignant d'un savoir-faire millénaire d'adaptation (Ravéreau, 1981, p.145-176).

Le ksar de Ghardaïa, fondé en 1048 par les Ibadites, s'inscrit dans la logique d'implantation défensive et religieuse des ksour du M'Zab. Bâti sur un piton rocheux, il s'organise de manière concentrique autour de la mosquée centrale dont le minaret obélisque domine la vallée, illustrant le principe de centralité sacrée (Benkari, 2014, p.152-153). La structure urbaine du ksar repose sur une dualité fondamentale entre sacré et profane : au sommet, la mosquée et son minaret dominant le tissu bâti, symbolisant la centralité religieuse et spirituelle de la communauté, tandis qu'en contrebas, la place du marché et les souks constituent l'espace profane, ouvert aux étrangers et marquant la transition entre l'intérieur communautaire et l'extérieur du ksar (Masqueray, 1887 ; Mercier, 1922). Le réseau viaire reflète cette organisation en se déployant selon une hiérarchie claire : des voies publiques reliant les portes à la mosquée, des voies collectives desservant les quartiers et des ruelles privées menant aux habitations, hiérarchie que les textes du « *fiqh* » rapportés par Ahmed Ibn Muhammad Ibn Bakr (1997) « *Al-Farastai* » a mis en évidence. Cette structuration traduit un principe d'égalitarisme social où chaque famille dispose d'un logement similaire, comme l'ont montré Ravéreau (1981) et Donnadieu et al. (1977), soulignant la cohésion communautaire ibadite. La forme urbaine demeure relativement stable durant plusieurs siècles, la croissance démographique étant absorbée par des mécanismes internes, notamment la surélévation des maisons, et par une gestion collective qui limite les écarts sociaux. Avec la colonisation française (1830-1962), l'évolution urbaine du ksar prend un tournant décisif. Les Mozabites, refusant l'installation d'étrangers à l'intérieur des ksours, voient se développer un quartier européen en périphérie, notamment dans la palmeraie de Ghardaïa, où s'installent les colons et l'administration coloniale. Ce processus entraîne une dissociation progressive entre la ville traditionnelle et les extensions modernes (Benkari, 2014, p. 203-232).

Le réseau viaire des ksour du M'Zab est un système organique hiérarchisé, directement lié à la topographie et au rôle central de la mosquée : des axes principaux relient la mosquée aux portes et à la place du souk, des voies secondaires desservent les quartiers et des ruelles privées conduisent aux habitations. Ce tracé épouse le relief dont les rues, étroites, sinueuses et parfois couvertes, fournissent ombrage et protection contre le vent et la chaleur tout en renforçant l'introversion et les fonctions défensives du ksar (Benyoucef, 2010, p.63-70). La hiérarchie des voies est également encadrée par des prescriptions du « *fiqh* » ibadite, comme le rappelle Al-Farastai (1997), qui interdit par exemple d'approprier l'air public en

construisant en saillie sur la rue. Enfin, les descriptions de Mercier (1922) et de Ravéreau (1981), complétées par les observations architecturales de Donnadiou et al. (1977), mettent en évidence que la structure du réseau viaire reflète une organisation sociale fondée sur une distinction claire entre espaces publics et privés, ainsi qu'une adaptation pragmatique aux contraintes climatiques et aux impératifs défensifs.

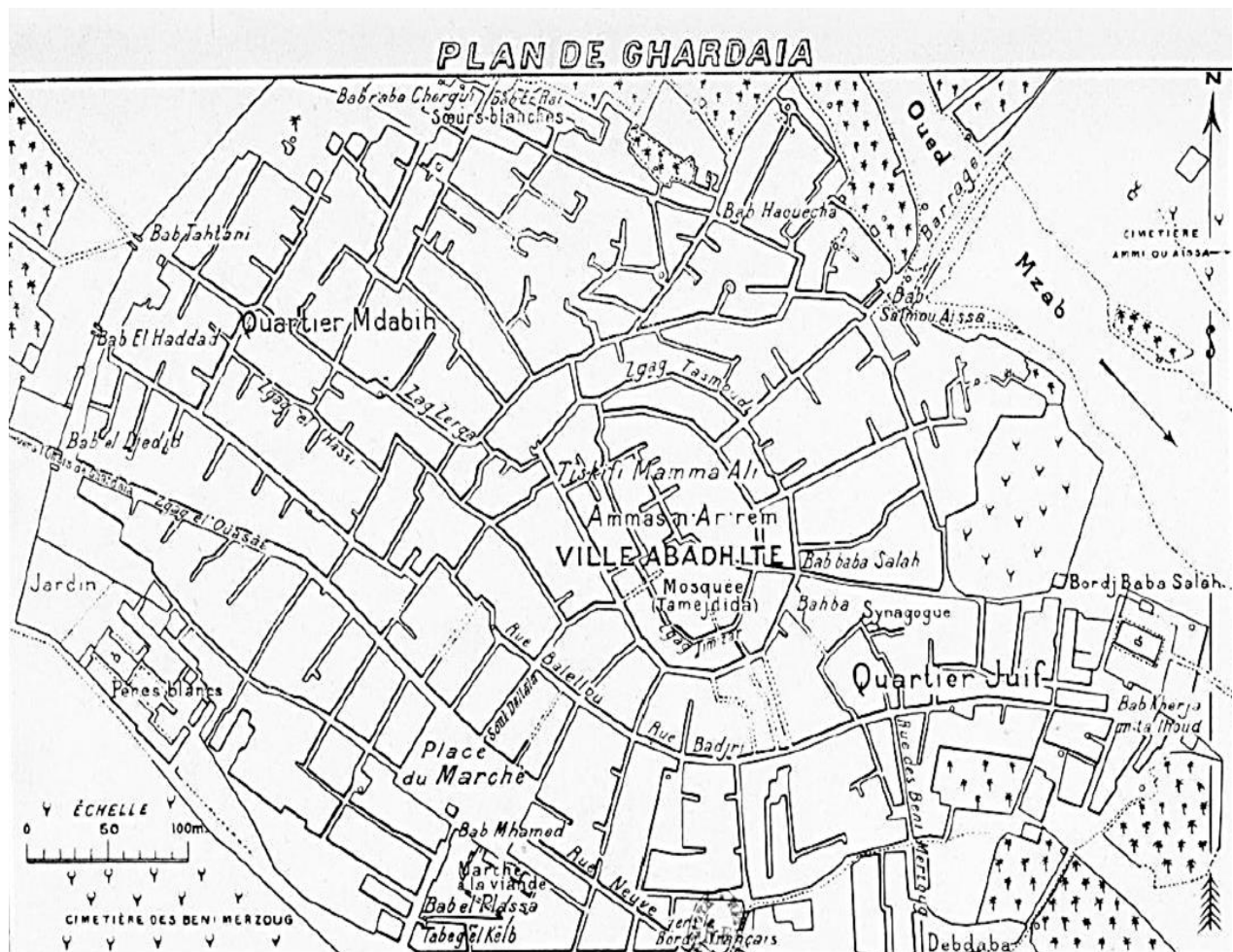


Figure 8.14. Structure urbaine du Ksar de Ghardaïa au début des années 1920. Source : Mercier (1922)



Figure 8.15. Morphogenèse hypothétique du Ksar de Ghardaïa en anneaux radioconcentriques selon Benkari. Source : Benkari (2014)

3.5. Ksar de Ouargla

Le ksar de Ouargla est situé dans la vallée de l'Oued Mya, au cœur du Bas-Sahara, à environ 800 km au sud-est d'Alger et en lisière du grand erg oriental (Bencherif, 2007, p. 250-251). Cette implantation est stratégique, car Ouargla se trouve à la croisée des axes caravaniers transsahariens reliant le Maghreb, le Sahel et l'Orient, ce qui a favorisé très tôt son rôle de relais commercial et religieux (Capot-Rey, 1953, p. 103-105). Le ksar s'appuie sur un site oasien dont les palmeraies et les ressources en eau souterraine ont permis la fixation de populations sédentaires et le développement agricole. Enfin, sa position géographique lui confère un rôle de carrefour régional entre les steppes du Nord et les espaces désertiques du Sud, ce qui explique son importance historique dans l'organisation du Sahara (Côte, 1993).

Le ksar de Ouargla, fondé en Xe et développé entre les Xe et XIIe siècles sous l'impulsion des réseaux ibadites, devient un centre religieux et politique majeur du Bas-Sahara. Protégé par des remparts dès 1209, il occupe une position stratégique au croisement des routes caravanières reliant Maghreb, Sahel et Orient. « *Al-Idrīsī* » souligne son rôle de relais commercial important, notamment dans le transit de l'or et des esclaves. (Bencherif, 2007, p. 294). La morphologie originelle du ksar illustre parfaitement la logique des ksours sahariens. Elle est centrée sur la mosquée principale et son souk hebdomadaire, véritables cœurs spirituel et économique de la communauté. Le réseau viaire se développe sous forme de ruelles étroites en chicane, parfois en impasses, qui desservent les quartiers groupés selon le rapprochement familiale. Cette organisation traduit différentes intention : répondre aux impératifs défensifs en limitant l'intrusion extérieure, traduire l'organisation socio-culturelle et les exigences religieuses, et s'adapter aux conditions climatiques par la compacité des constructions. Les habitations, bâties en terre crue, s'accolent les unes aux autres et s'intègrent dans un système urbain protégé par des murailles et percé de sept portes de contrôle, garantissant à la fois la sécurité et une régulation des flux d'entrée et de sortie (Echallier, 1968, p.77-78). La période coloniale introduit des transformations profondes qui, tout en conservant la trame ancienne, modifient sensiblement l'organisation spatiale. En 1881, les fossés entourant le ksar sont comblés et remplacés par un boulevard, marquant une rupture nette avec la logique d'enceinte fermée qui avait prévalu pendant des siècles. L'urbanisme colonial, conduit des percées à travers le tissu ancien, imposant une rationalisation des circulations et une intégration du ksar dans le nouvel ordre spatial promu par l'administration coloniale française. (Godard, 1954).



Figure 8.16. Structure urbaine du Ksar de Ouargla. Source : O.G.E.B.C. de Ouargla (2011).

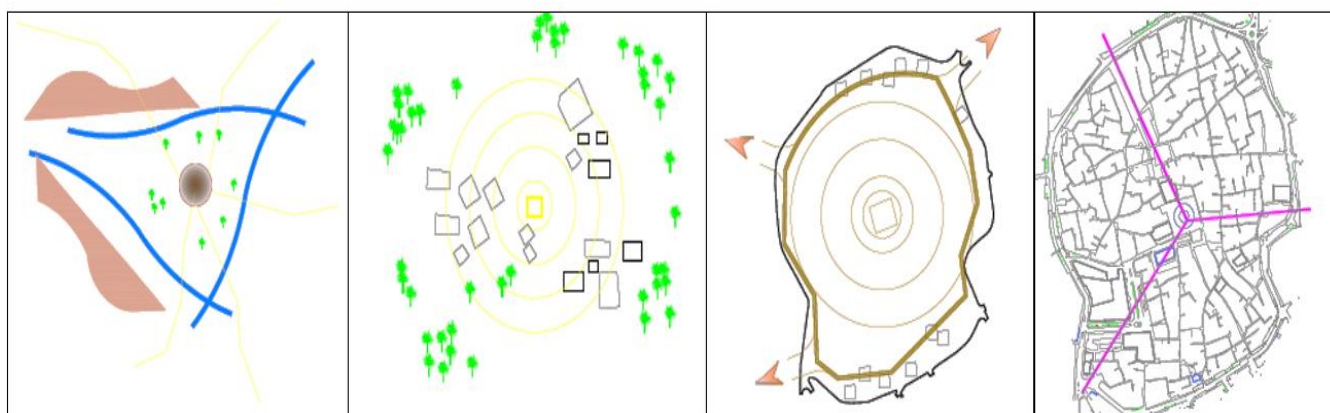


Figure 8.17. Morphogénèse hypothétique du Ksar de Ouargla en selon l'OGEBC. Source : O.G.E.B.C. de Ouargla (2011).

L'étude des quatre villes traditionnelles : la Casbah d'Alger, la médina de Tlemcen, le ksar de Ghardaïa et le ksar de Ouargla, montre des histoires et des contextes géographiques différents, mais aussi des points communs dans leur forme urbaine. Malgré la diversité des milieux et des influences politiques, on retrouve les mêmes caractéristiques morphologiques : des réseaux hiérarchisés de rues, une séparation claire entre espaces publics et privés, une centralité religieuse et commerciale, ainsi qu'une compacité adaptée aux contraintes locales. Ces traits révèlent une organisation à plusieurs échelles. Les réseaux viaires s'articulent en niveaux successifs, des grands axes jusqu'aux impasses, selon une logique qui rappelle l'autosimilarité fractale. La morphogenèse de ces villes apparaît ainsi comme le produit d'une dynamique complexe, marquée par l'adaptation, l'auto-organisation et une évolution progressive dans le temps. Ces résultats ouvrent la voie à une analyse plus précise grâce à la théorie des réseaux et aux outils fractals. L'objectif n'est pas seulement de décrire les formes urbaines, mais aussi de vérifier si les principes d'invariance d'échelle et de loi de puissance, déjà observés dans d'autres villes du monde. Cela permettra de tester la validité du modèle fractal comme cadre d'interprétation de la morphogenèse urbaine traditionnelle.

4. Méthode et données

Pour vérifier la morphogenèse de la ville islamique traditionnelle en Algérie à l'aide du modèle fractal, nous appliquons la méthodologie de la théorie des réseaux (voir figures 8.18 et 8.19). L'analyse porte principalement sur l'invariance d'échelle du réseau viaire, testée dans les quatre villes traditionnelles déjà présentées. Les réseaux de rues, une fois convertis en graphes, sont désignés sous le terme de réseaux spatiaux (Fall et al., 2007). Dans ce cadre, le modèle de graphe primal représente un type de graphe planaire où les intersections sont transformées en nœuds et les rues en liens. Par conséquent, l'ensemble du réseau viaire est converti en un réseau spatial intégré dans un espace réel bidimensionnel (Boeing, 2018b). Parallèlement, les mesures de centralité sont fréquemment adoptées dans la théorie des réseaux. De nombreuses mesures de ce type ont été développées, notamment la centralité de degré (*Degree Centrality*, DC), la centralité de proximité (*Closeness Centrality*, CC), la centralité d'intermédierité (*Betweenness Centrality*, BC) et la centralité d'information (*Information Centrality*, IC) et bien d'autres (Agryzkov et al., 2017). Principalement, la centralité dans un réseau sert à quantifier le fait que certains nœuds sont plus importants que d'autres. Par exemple, la centralité d'intermédierité (BC) révèle que certains espaces sont structurellement conçus pour être traversés, tandis que la centralité de proximité (CC) indique que certains espaces sont plus proches des autres (Crucitti et al., 2006). De leur côté, Porta et al. (2006) montrent que l'application de diverses mesures de centralité appliquées aux villes autoorganisées a révélé un comportement invariant d'échelle, caractérisé par des distributions en loi de puissance.

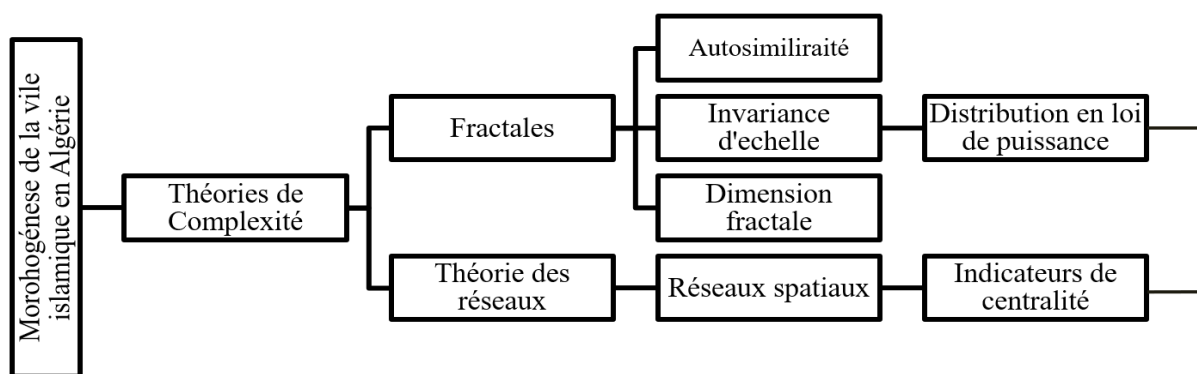


Figure 8.18. Schéma conceptuel reliant la morphogénèse, la complexité et la nature fractale d'un réseau viaire.
Source : auteur

En effet, la méthode de théorie de réseaux en graphe primal est à la fois objective et réaliste, son avantage résidant dans sa capacité à capturer les propriétés géométriques et topologiques du tissu urbain. Cette méthode a été vérifiée et appliquée à diverses villes organiques autoorganisées dans de nombreuses études (Buhl et al., 2006 ; Crucitti et al., 2006 ; Porta et al., 2006 ; Boeing, 2018b ; Sharifi, 2019). Cependant, d'autres modèles complémentaires ont été développés, explorant différentes informations et appliquant d'autres indicateurs. Un exemple en est le modèle de graphe dual (Añez et al., 1996 ; Hillier, 1999 ; Jiang et Claramunt, 2004). Comme illustré aux figures 8.18 et 8.19, notre approche est basée sur la méthode du graphe primal et consiste en quatre étapes principales : la modélisation, le calcul, la distribution et la vérification. La nature fractale est examinée à travers la distribution statistique en loi de puissance, qui est vérifiée à l'aide des indicateurs de centralité d'intermédiation (CB) et de centralité de proximité (CC).

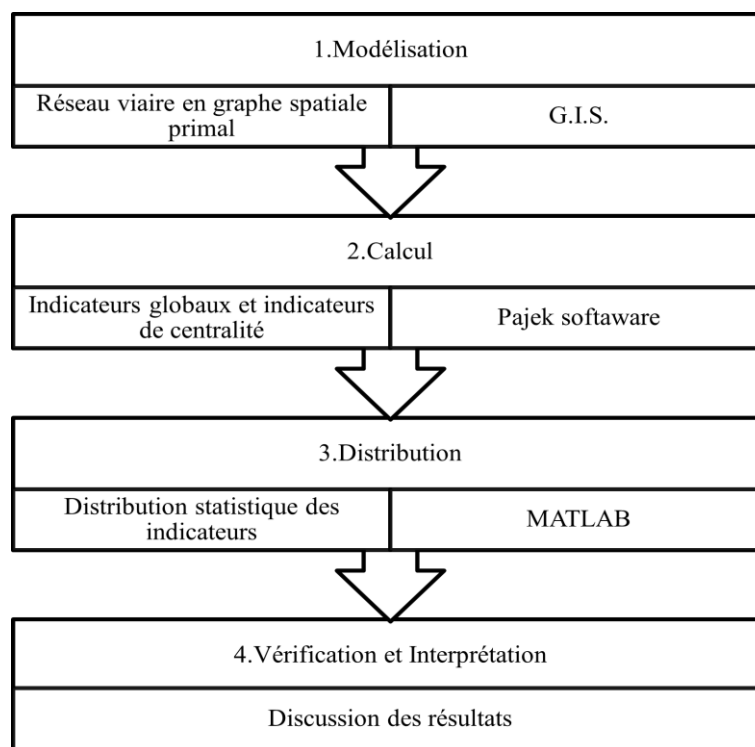


Figure 8.19. Etapes de la méthode appliquée dans l'analyse. Source : auteur.

Premièrement, en utilisant la projection globale Mercator WGS84, nous extrayons les réseaux de rues d'Open Street Map (OSM). Ces réseaux sont corrigés à l'aide d'un Système d'Information Géographique (S.I.G.) et complétés par des cartes historiques : cartes de 1831 du capitaine Morin et carte des structures urbaines de l'Atelier casbah pour Alger ; carte de 1842 pour Tlemcen ; carte de 1922 pour Ghardaïa ; et la carte de 1954 pour Ouargla. Les cartes historiques sont plus détaillées, car celles d'OSM ne comportaient pas l'état initial des réseaux routiers avant les modifications significatives de l'époque coloniale française et après l'indépendance. Ensuite, chaque réseau de rues est modélisé comme un réseau spatial primal par S.I.G. (voir figure 8.20). Deuxièmement, à l'aide du logiciel *Pajek* (Mrvar et Batagelj, 2016), les indicateurs globaux des réseaux spatiaux sont calculés : nombre de nœuds (sommets) N , nombre de liens (arêtes) K , longueur de chemin moyen l et le Coefficient de Clustering (CC_i). *Pajek* est un logiciel gratuit pour l'analyse et la visualisation de grands réseaux. Il fournit un large éventail de méthodes pour le traitement de différents types de données. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1. De plus, la centralité d'intermédierité et la centralité de proximité sont calculées à l'aide de *Pajek*.



Figure 8.20. Réseaux spatiaux des villes traditionnelles analysées : (A) Alger ; (B) Tlemcen ; (C) Ghardaïa ; et (D) Ouargla. Source : auteur.

Troisièmement, les réseaux spatiaux sont importés dans MATLAB pour l'analyse de la distribution statistique à l'aide de la méthode de test de loi de puissance de Clauset et al. (2009) et Virkar et Clauset (2014). Leur approche est basée sur l'estimation des paramètres α et X_{min} en utilisant un estimateur du maximum de vraisemblance (EMV), et sur le calcul de la qualité de l'ajustement entre les données et la distribution de loi de puissance. La loi de puissance est considérée comme une hypothèse plausible pour les données si la p-valeur résultante est supérieure à 0,1, sinon elle est rejetée. L'approche a d'abord été introduite pour des données continues et discrètes, et une extension aux données groupées a suivi dans (Virkar et Clauset, 2014). Dans cette étude, nous utilisons la méthode des données groupées car les indicateurs calculés sur les graphes présentent une nature groupée. Le paramètre α est la pente de la distribution hypothétique de loi de puissance, et X_{min} est la valeur de départ à partir de laquelle la distribution peut s'ajuster à une loi de puissance. Avec les données groupées, la valeur critique X_{min} est remplacée par b_{min} .

Un jeu de données regroupées en classes « *binned data* » est une représentation des données où les valeurs numériques continues ou discrètes sont regroupées en intervalles, ou classes, et où la fréquence ou le nombre de points de données tombant dans chaque classe est enregistré. Suivant Virkar et Clauset (2014) : étant donné $\{x_1, \dots, x_N\}$ comme N observations empiriques, l'opération de regroupement produit des bornes de classes des bornes de classes B et les comptages à l'intérieur de ces classes H . Soit k le nombre de classes, les bornes de classes B sont définies comme :

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_k) \quad (8.2)$$

Où $b_1 > 0$, $k > 1$, et la i -ème classe couvre l'intervalle $x \in [b_i, b_{i+1}[$. Les comptages de classes H sont définis comme :

$$H = (h_1, h_2, \dots, h_k) \quad (8.3)$$

Où $h_i = \# \{b_i \leq x < b_{i+1}\}$ compte le nombre d'observations dans la i -ème classe.

Avec les données regroupées, la valeur critique X_{min} est remplacée par b_{min} , la borne à partir de laquelle la loi de puissance est valide. Cette valeur est inconnue a priori. Pour sélectionner la valeur appropriée, l'approche suit les étapes suivantes :

1. Pour chaque $b_{min} \in (b_1, b_2, \dots, b_{k-1})$, ajuster une loi de puissance aux données regroupées pour estimer α à partir des comptages h_{min} .
2. Calculer la statistique de bonne adéquation de Kolmogorov-Smirnov (KS) entre la fonction de distribution cumulée ajustée (CDF) et la distribution empirique.
3. Choisir comme b_{min} la borne de classe correspondant à la plus petite statistique KS.

La statistique KS mesure la distance maximale entre deux CDFs (Clauset et al., 2009) et est définie comme :

$$D = \max_{b \geq b_{min}} |S(b) - P(b)| \quad (8.4)$$

Où $S(b)$ est la CDF des données regroupées pour les classes à partir de b_{min} et au-dessus, et $P(b)$ la CDF pour le modèle de loi de puissance ajusté.

En supposant que les données suivent une loi de puissance au-dessus de b_{min} la fonction de log-vraisemblance est :

$$\mathcal{L} = n(\alpha - 1) \ln b_{min} + \sum_{i=min}^k h_i \ln [b_i^{(1-\alpha)} - b_{i+1}^{(1-\alpha)}] \quad (8.5)$$

Où $n = \sum_{i=min}^k h_i$ est le nombre d'observations dans les classes b_{min} et au-dessus.

Pour un schéma de regroupement logarithmique, une forme fermée pour obtenir α est donnée par le MLE suivant :

$$\alpha = 1 + \log_c \left[1 + \frac{1}{(s-1) - \log_c b_{min} + (1/n) \sum_{i=min}^k i h_i} \right] \quad (8.6)$$

Où les bornes de classes sont $B = (c^s, c^{s+1}, \dots, c^{s+k})$ comme puissances successives d'une constante c , et s est la puissance de la plus petite classe. Dans le cas d'autres schémas de regroupement, comme les classes linéaires, il n'existe pas de forme fermée pour estimer α . Il est alors estimé via une procédure itérative où la valeur de α qui maximise l'équation (8.5) est choisie comme solution. Virkar et Clauset (2014) utilisent pour cela la méthode d'optimisation de Nelder-Mead.

Après avoir estimé les valeurs de α et b_{min} l'étape suivante consiste à vérifier si l'hypothèse de loi de puissance est plausible. Pour ce faire, l'approche suit cinq étapes :

1. Calculer la distance D^* entre le modèle ajusté M et les comptages H via l'équation (8.4).
2. Générer un jeu de données synthétique de N valeurs suivant une loi de puissance binned avec le paramètre α à b_{min} et au-dessus, mais suivant la distribution empirique en dessous de b_{min} . Les comptages synthétiques sont notés $\hat{H}$.
3. Ajuster le modèle de loi de puissance à $\hat{H}$, donnant un nouveau modèle $\hat{M}$ avec les paramètres $\hat{\alpha}$ et $\hat{b}_{min}$.
4. Calculer la distance entre $\hat{M}$ et $\hat{H}$.
5. Répéter les étapes 2 à 4 plusieurs fois, et calculer $p = P(D \geq D^*)$, la fraction des distances au moins aussi grandes que D^* .

Si $p \leq 0.1$ l'hypothèse de loi de puissance est rejetée ; sinon, les données sont compatibles avec une distribution en loi de puissance.

Notre analyse vérifie si les distributions des deux indicateurs, la Centralité d'Intermédierité (BC) et la Centralité de Proximité (CC), correspondent à une distribution de loi de puissance. Leurs valeurs ont été transformées en valeurs groupées à l'aide de la méthode de groupement linéaire. Les résultats des tests de : α , b_{min} et de la p-valeur sont présentés dans le Tableau 2. De plus, les histogrammes des distributions de la Centralité d'Intermédierité sont présentés dans la figure 8.21, et ceux de la Centralité de Proximité dans la figure 8.22.

5. Discussion et interprétation des résultats

Les valeurs des indicateurs globaux apparaissent globalement proches pour l'ensemble des réseaux viaires étudiés, ce qui suggère l'existence d'une unité typologique dans la structure des villes islamiques traditionnelles analysées. Cette convergence traduit un mode de croissance urbaine fondé sur des principes similaires : compacité, continuité du tissu, forte intégration sociale et adaptation progressive aux contraintes locales. Néanmoins, certaines différences apparaissent, notamment dans le cas de la Casbah d'Alger, qui se distingue par des valeurs légèrement plus élevées. Cette singularité s'explique par la richesse historique et la complexité évolutive de la capitale, dont le statut politique, économique et culturel a entraîné un développement plus dense et plus diversifié que dans les autres villes étudiées.

Concrètement, cette supériorité se manifeste par un plus grand nombre de rues, d'habitations et d'habitants, qui a favorisé la multiplication d'actions locales (ouvertures de voies secondaires, ajustements morphologiques) mais aussi d'actions globales (interventions de planification, structuration d'axes majeurs). Ces dynamiques imbriquées confèrent au réseau de la Casbah une intensité particulière, où l'organisation spatiale reflète à la fois des logiques communautaires de voisinage et des fonctions urbaines d'échelle plus large. Ainsi, si l'on observe une typologie commune à toutes les villes analysées, la Casbah illustre bien la capacité de ce modèle à intégrer une diversité d'évolutions et d'usages, témoignant de la flexibilité et de la robustesse des formes urbaines islamiques traditionnelles.

La longueur moyenne des chemins, qui reste relativement courte dans l'ensemble des villes étudiées, confirme que ces tissus urbains sont tracés à l'échelle humaine. Les habitants pouvaient ainsi parcourir la ville à pied sans effort excessif, grâce à des rues étroites et connectées qui favorisent les déplacements de proximité. Ce résultat traduit bien l'importance des actions locales des habitants dans la construction progressive de la forme urbaine. Cependant, il faut rappeler cette mesure est calculée de façon topologique, c'est-à-dire en nombre d'intersections franchies, et qu'elle ne correspond pas toujours aux distances réelles perçues par les usagers. En ce qui concerne le coefficient de clustering, ses valeurs relativement basses suggèrent que les rues forment un réseau assez homogène, sans excès de boucles ou de regroupements fermés. Cela signifie que chaque rue est intégrée dans l'ensemble du réseau plutôt que dans de petits sous-quartiers isolés. Il signifie aussi la

compacité générale du tissu et le rôle structurant de quelques axes majeurs dans l'ensemble du réseau

Tableau 8.1. Indicateurs globaux des réseaux spatiaux analysés.

Réseau spatial	Indicateurs globaux			
	Noeds (N)	Liens (K)	Longueur de chemin moyen (l)	Coefficient de Clustering (CCi)
Casbah d'Alger	615	713	15,82	0,41
Médina de Tlemcen	217	405	5,53	0,1
Ksar de Ghardaïa	276	495	12,20	0,33
Ksar de Ouargla	331	592	5,48	0,42

Comme le montrent la figures 8.21 et 8.22, la Centralité d'Intermédierité (BC) présente clairement un motif de distribution à queue lourde, ce qui n'est pas le cas pour la Centralité de Proximité (CC), qui affiche un motif plus similaire à une distribution normale. Simultanément, pour les deux indicateurs, Intermédierité et Proximité, les p-valeurs pour toutes les études de cas dépassent 0,1, ce qui confirme que la condition $p\text{-valeur} \geq 0,1$ est satisfaite. Ceci confirme la distribution de loi de puissance comme démontré par (Virkar et Clauset, 2014) ainsi que la nature invariante d'échelle de tous les réseaux spatiaux analysés. Le paramètre α indique le facteur d'échelle dans la distribution ; la plupart de ses valeurs sont ≥ 2 , renforçant la confirmation de la distribution de loi de puissance des indicateurs (Clauset, et al., 2009). Contrairement à la p-valeur, les différences entre les indicateurs sont frappantes. Les valeurs de b_{min} sont généralement plus élevées pour la Proximité que pour l'Intermédierité.

Au-delà de la validation globale, il faut remarquer que les valeurs de b_{min} élevées pour la centralité de proximité exprime que la loi de puissance ne s'applique pas à toute la distribution, mais seulement à une partie réduite des données. Autrement dit, l'ajustement statistique est plus solide pour l'intermédierité que pour la proximité. Cette différence invite à nuancer l'interprétation des résultats : la centralité d'intermédierité met clairement en évidence une organisation hiérarchisée où quelques rues jouent un rôle majeur dans la structuration du réseau. En revanche, la centralité de proximité reflète davantage une répartition régulière des distances, ce qui traduit une certaine homogénéité locale qui correspond autrement au schéma fractal.

Ces résultats montrent donc que les deux indicateurs ne disent pas exactement la même chose, mais qu'ils se complètent. L'intermédierité révèle la présence d'axes dominants, essentiels à la cohésion du réseau et aux grands flux de circulation, tandis que la proximité

met en lumière une trame fine et accessible, adaptée aux déplacements quotidiens et à l'échelle humaine. Ensemble, ils permettent de mieux comprendre la morphogenèse des villes traditionnelles algériennes, en montrant que leur tissu urbain repose à la fois sur une forte hiérarchie des voies et sur une densité locale garantissant la proximité et la vie de voisinage.

Tableau 8.2. Résultats de l'analyse du test de loi de puissance des réseaux spatiaux.

Réseau spatial	Distribution en loi de puissance					
	Centralité d'Intermédierité (BC)			Centralité de Proximité (CC)		
	α	b_{min}	P-valeur	α	b_{min}	P-valeur
Casbah d'Alger	7.42	0.12	0.4	34.18	0.1	0.6
Médina de Tlemcen	2.07	0.03	0.53	17.05	0,22	0,3
Ksar de Ghardaïa	1.72	0.01	0.38	29,6	0.1	0.28
Ksar de Ouargla	2.29	0.02	0.18	16.11	0.21	0.9

Sur la base de ces résultats, il apparaît que la distribution des indicateurs étudiés est, compatible avec une loi de puissance, ce qui suggère l'existence d'une invariance d'échelle dans les réseaux viaires analysés. Cette propriété, caractéristique des systèmes complexes, implique que les structures urbaines observées ne sont pas aléatoires mais obéissent à des régularités qui se répètent à différentes échelles. Les réseaux invariants d'échelle tendent à évoluer selon une croissance incrémentale et multiplicative, façonnée sur de longues périodes par une accumulation d'actions locales (ouverture de ruelles, ajustements progressifs des tracés) et seulement un nombre limité d'actions globales de grande ampleur.

Ce processus organique de formation conduit à une transformation progressive du réseau existant, où chaque nouvelle rue s'insère en cherchant à se connecter aux structures déjà établies. Cette dynamique cumulative explique la cohérence interne du tissu viaire et éclaire la genèse comme l'évolution des villes islamiques traditionnelles étudiées. Ainsi, loin d'être le produit d'un désordre ou d'une planification rigide, ces villes apparaissent comme le résultat d'un processus autoorganisé, dans lequel la logique locale des habitants s'articule à une organisation globale émergente. Dans ce cadre, la ville islamique traditionnelle en Algérie peut être interprétée comme un système urbain à tendance organique, où l'invariance d'échelle constitue l'une des manifestations fractales les plus significatives. Cette propriété nous renseigne sur l'existence d'un processus morphogénétique cohérent, qui confère aux formes urbaines leur stabilité et leur adaptabilité dans le temps, tout en contrastant avec des modèles explicatifs antérieurs souvent jugés subjectifs, ambigus ou réducteurs.

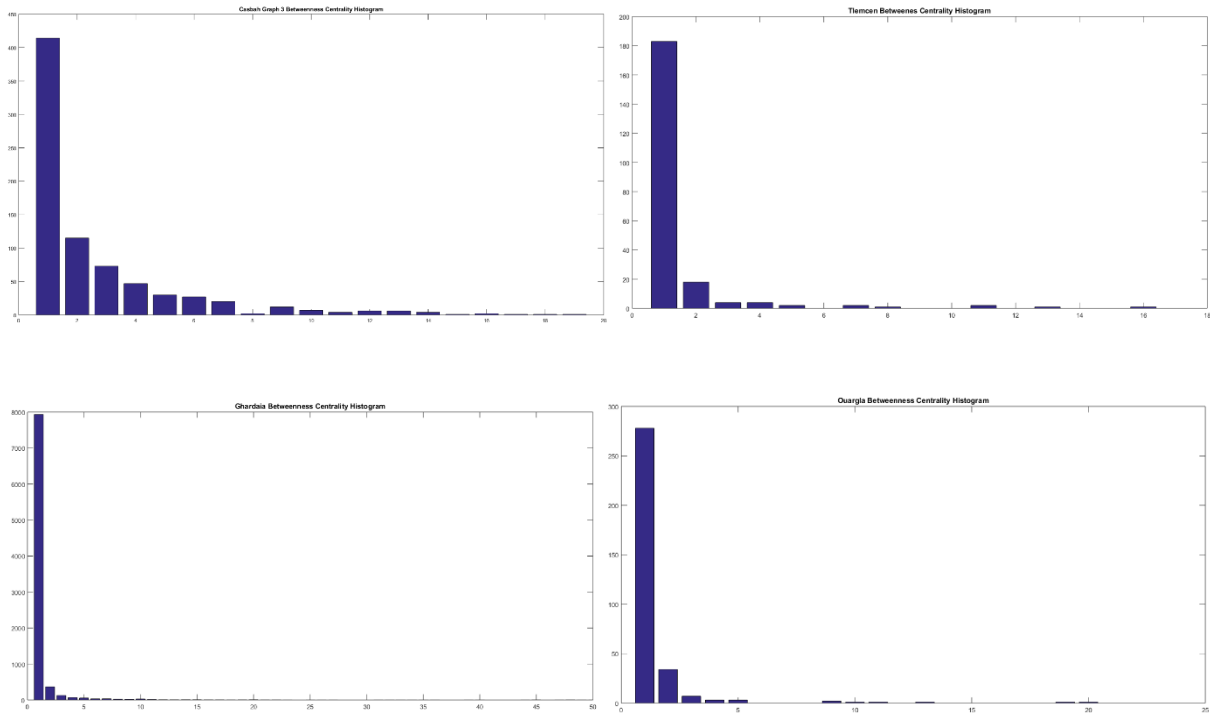
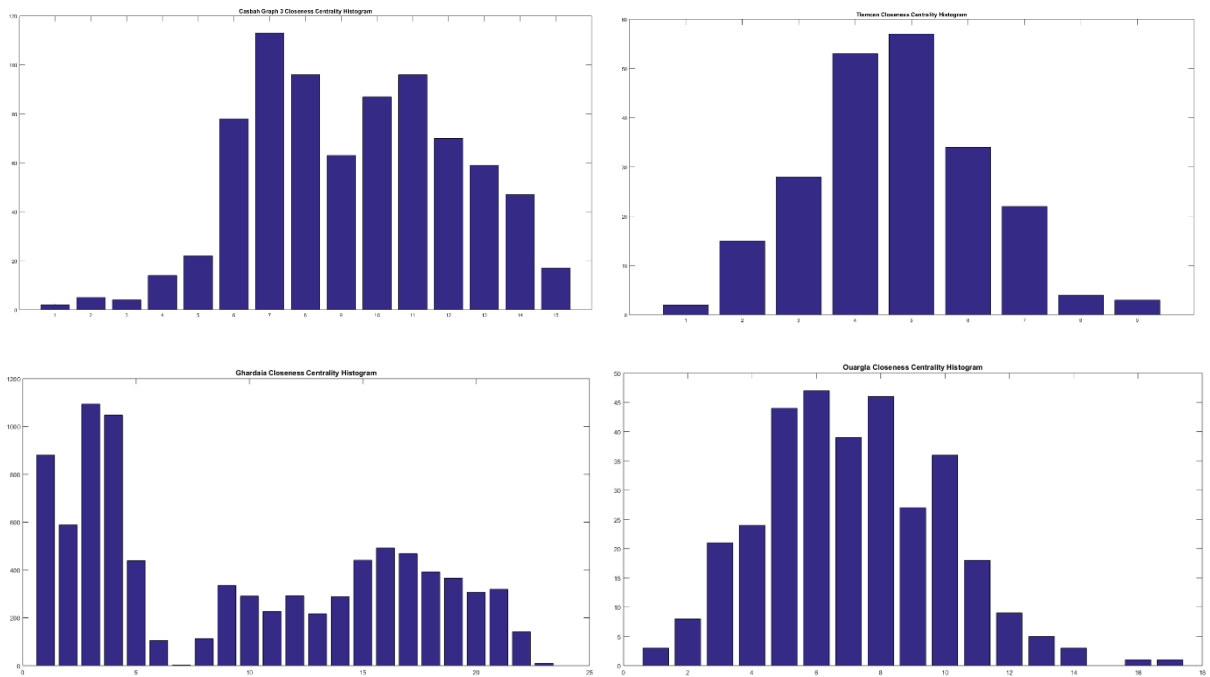


Figure 8.21. Histogrammes de la centralité d'intermédiarité des villes traditionnelles : (A) Alger ; (B) Tlemcen ; (C) Ghardaïa ; et (D) Ouargla. Source : auteur.



Figures 8.22. Histogramme de la centralité de proximité des villes traditionnelles : (A) Alger ; (B) Tlemcen ; (C) Ghardaïa ; et (D) Ouargla. Source : auteur.

. Conclusion

Ce chapitre a clôturé l'étude des villes islamiques traditionnelles en Algérie en les abordant à travers le prisme de la théorie de la complexité, cadre conceptuel qui permet d'analyser les systèmes urbains comme des structures dynamiques et autoorganisées. Pour ce faire, il a mobilisé conjointement la géométrie fractale, qui offre des outils pour saisir l'invariance d'échelle, et la théorie des réseaux, qui permet de traduire le réseau viaire en graphes mesurables et comparables. Cette double approche a permis d'aller au-delà d'une simple lecture descriptive de l'irrégularité apparente, en révélant la cohérence interne et les régularités cachées derrière la morphologie des villes islamiques.

L'analyse empirique, fondée sur les indicateurs de centralité d'intermédiarité et de centralité de proximité, a fourni une base opérationnelle pour tester la robustesse du modèle fractal. Appliquée à quatre cas représentatifs : la Casbah d'Alger, la médina de Tlemcen, le ksar de Ghardaïa et le ksar de Ouargla. Cette méthodologie a démontré que leurs réseaux viaires présentent bien une invariance d'échelle et des distributions en loi de puissance. Ces résultats attestent que la morphogenèse de ces villes n'est pas le produit du hasard ou de décisions ponctuelles, mais qu'elle procède d'un processus incrémental, autoorganisé et hiérarchisé, qui a généré des structures adaptées aux contraintes sociales, culturelles, et environnementales.

Au-delà de la seule validation méthodologique, l'apport majeur de cette recherche réside dans la mise en évidence de la pertinence du modèle fractal pour comprendre la genèse et l'évolution des tissus urbains islamiques. Elle permet de réinterpréter ces formes historiques à travers un cadre scientifique objectif et de dépasser les anciennes lectures subjectives qui réduisaient la ville islamique à une organisation irrationnelle ou chaotique. Elle révèle, au contraire, une logique urbaine subtile, où la complexité est porteuse d'ordre et de cohérence. Ainsi, le modèle fractal appliqué aux villes islamiques algériennes apparaît non seulement comme une clé de lecture opératoire, mais aussi comme un outil conceptuel puissant pour repenser l'histoire et l'évolution des formes urbaines.

. Notes et références bibliographiques

Batty, M. (2013). *The new science of cities* [eBook edition]. Cambridge, MA: MIT Press.

Jiang, B. (2015). A city is a complex network. In M. W. Mehaffy (Ed.), *Christopher Alexander: A city is not a tree – 50th anniversary edition* (Chap. 6). Sustasis Press.

Portugali, J. (2012). Complexity theories of cities: Achievements, criticism and potentials. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), *Complexity theories of cities have come of age* (pp. 47–62). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_4.

Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude : Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste* [Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d'Azur, Nice].

Basili, L. L. (1998). The fractal geometry of urban organisation: Beyond the crisis of 'spontaneous order'. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 267–295). Physica-Verlag.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_8.

- Mandelbrot, B. (1982). *The fractal geometry of nature*. San Francisco: W. H. Freeman.
- Dauphiné, A. (2011). *Géographie fractale : Fractals auto-similaire et auto-affine*. Paris : Hermès-Lavoisier.
- Pumain, D. (1998). Urban research and complexity. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 323–337). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_10.
- Allen, P. M. (2005). *Cities and regions as self-organizing systems: Models of complexity* (eBook ed.). Taylor & Francis e-Library.
- Batty, M., et Longley, P. (1994). *Fractal cities: A geometry of form and function* [eBook edition]. Academic Press.
- Akbar, J. A. (2021). *Crisis in the built environment: The case of the Muslim city* (2nd ed.) [E-book]. Insan Publications.
- Ben Hamouche, M. (2009). Can chaos theory explain complexity in urban fabric? Applications in traditional Muslim settlements. In K. Williams (Ed.), *Nexus network journal* (Vol. 11, No. 2). Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8976-5_6.
- Ben Hamouche, M. (2011). Fractal geometry in Muslim cities: How succession law shaped morphology. *Nexus Network Journal*, 13(2), 235–251. <https://doi.org/10.1007/s00004-011-0062-8>.
- Raymond, A. (2008). The spatial organization of the city. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The city in the Islamic world* (Vol. 1, pp. 47–70). Brill. <https://doi.org/10.1163/ej.9789004162402.i-1500.15>.
- Al-Hathloul, S. (1981). *Tradition, continuity and change in the physical environment: The Arab-Muslim city*. [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].
- Mortada, H. (2003). *Traditional Islamic principles of the built environment* [eBook edition]. Routledge.
- Bölen, F., & Kaya, H. S. (2017). Urban DNA: Morphogenetic analysis of urban pattern. *ICONARP International Journal of Architecture and Planning*, 5(1), 10–41. <https://doi.org/10.15320/ICONARP.2017.15>.
- Brunschvig, R. (1947). Urbanisme médiéval et droit musulman. *Revue des Études Islamiques*, 15, 125–155.
- Hakim, B. (2008). Law and the city. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The city in the Islamic world* (Vol. 1, pp. 71–92). Brill. <https://doi.org/10.1163/ej.9789004162402.i-1500.20>.
- Ben Hamouche, M. (2010). Urban regulation in Islamic law through an Ottoman manuscript. *Journal of Islamic Law and Culture*, 12(3), 284–307. <https://doi.org/10.1080/1528817X.2010.626173>.
- BenHamouche, M. (2003). Decision-making system and urban geometry in traditional Muslim cities: The case of Algiers 1516–1830. *Journal of Architectural and Planning Research*, 20(4), 307–322. <https://www.jstor.org/stable/43030669>.
- Stilt, K., & Saraçoğlu, M. S. (2018). Hisba and Muhtasib. In A. M. Emon & R. Ahmed (Éds.), *The Oxford handbook of Islamic law* (pp. 326–356). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199679010.013.9>.
- Alsayyad, N. (1991). *Cities and caliphs: On the genesis of Arab Muslim urbanism*. New York, NY: Greenwood Press.
- Hakim, B. S. (1986). *Arabic Islamic cities: Building and planning principles*. London: Routledge.
- Bianca, S. (2000). *Urban form in the Arab world: Past and present*. London: Thames & Hudson.

- Petrucchioli, A. (1999). The Arab city: Neither spontaneous nor created. *Environmental Design: Journal of the Islamic Environmental Design Research Centre*, 1–2, 22–33. Rome, Italy: Dell'Oca Editore.
<https://www.archnet.org/publications/3297>.
- Petrucchioli, A. (2002). New methods of reading the urban fabric of the Islamicized Mediterranean. *Built Environment*, 28(3), 202–216. <https://www.jstor.org/stable/23288452>.
- Petrucchioli, A. (2007). *After amnesia: Learning from the Islamic Mediterranean urban fabric*. Bari : ICAR.
- Akbar, J. A. (1984). *Responsibility and the traditional Muslim built environment* [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].
- Holme, A. (2010). *Geometry: Our cultural heritage* [eBook edition]. Springer.
- Eglash, R. (1999). *African fractals: Modern computing and indigenous design*. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press.
- Frankhauser, P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Paris : Anthropos (collection « Villes »).
- Boeing, G. (2018a). Measuring the complexity of urban form and design. *Urban Design International*, 23(4), 281–292. <https://doi.org/10.1057/s41289-018-0072-1>.
- Clauset, A., Shalizi, C. R., & Newman, M. E. J. (2009). Power-law distributions in empirical data. *SIAM Review*, 51(4), 661–703. <https://doi.org/10.1137/070710111>.
- Salingeros, N. A., Coward, L. A., West, B. J., et van Bilsen, A. (2005). *Principles of urban structure*. Amsterdam: Techne Press.
- Kalapala, V., Sanwalani, V., Clauset, A., & Moore, C. (2006). Scale invariance in road networks. *Physical Review E*, 73(2), 026130. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.026130>
- Mohajeri, N., Longley, P., & Batty, M. (2012). City shape and the fractality of street patterns. *Quaestiones Geographicae*, 31(2), 29–37. <https://doi.org/10.2478/v10117-012-0016-6>.
- Zhang, H., & Li, Z. (2012). Fractality and self-similarity in the structure of road networks. *Annals of the Association of American Geographers*, 102(2), 350–365. <https://doi.org/10.1080/00045608.2011.620505>.
- Ma, D., Guo, R., Zheng, Y., Zhao, Z., He, F., & Zhu, W. (2020). Understanding Chinese urban form: The universal fractal pattern of street networks over 298 cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 192. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040192>.
- Ravéreau, A. (1989). *La Casbah d'Alger et le site créa la ville*. Paris: Éditions Sindbad.
- Playfair, R. L. (1890). *Handbook for travellers in Algeria and Tunis*. London : John Murray.
- Shuval, T. (1998). *La ville d'Alger vers la fin du XVIIIe siècle : Population et cadre urbain*. Paris : CNRS Éditions.
- Pasquali, E. (1955). L'évolution de la rue musulmane d'El-Djezaïr. *Documents algériens, Série culturelle*, 75. Alger : Société nationale des Entreprises de Presse.
- El-Habib Tahari, B., et Kassab, T. (2019). Relief morphology and urban hydrography as historic sources: Algiers in the beginning of the Ottoman period. *International Journal of Historical Archaeology*, 23(1), 57–80. <https://doi.org/10.1007/s10761-018-0459-0>.
- Cresti, F. (2005). La population d'Alger et son évolution durant l'époque ottomane : Un état des connaissances controversé. *Arabica*, 52(4), 457–495. <https://doi.org/10.1163/157005805774320240>.

- Missoum, S. (2014). Andalusi immigration and urban development in Algiers (sixteenth and seventeenth centuries). In *The expulsion of the Moriscos from Spain: A Mediterranean diaspora* (pp. 329–356). Brill. https://doi.org/10.1163/9789004279353_015.
- Ben Hamouche, M. (1993). *Gestion urbaine de Dar Es-Soltane (Grand Alger 1516-1830) : Essai de ressourcement* [Thèse de doctorat, Université Paris 8].
- Raymond, A. (1985). *Grandes villes arabes à l'époque ottomane*. Paris : Sindbad. (Collection Bibliothèque arabe)
- Piesse, L., et Canal, J. (1889). *Tlemcen, les villes de l'Algérie*. Paris : Librairie Africaine et Coloniale.
- Oulebsir, N. (2004). *Les usages du patrimoine : Monuments, musées et politique coloniale en Algérie, 1830-1930*. Paris : Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme.
- Boukerche, D. (1989). *Évolution de la ville de Tlemcen pendant la période coloniale* [Mémoire de magister, École Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (EPAU), Alger].
- Kassab Baba Ahmed, T. (2007). *Antagonisme entre espaces historiques et développement urbain : Le cas de Tlemcen* [Thèse de doctorat, École Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (EPAU), Alger].
- Ravéreau, A. (1981). *Le M'Zab, une leçon d'architecture*. Paris: Sindbad.
- Benkari, N. (2014). *L'architecture des mosquées ibadites au M'Zab, à Djerba et en Oman: Lecture des principes de conception et de construction*. Saarbrücken: Verlag- Presses Académiques Francophones.
- Masqueray, E. (1878). Les Chéroniques du M'Zab. *Bulletin de la Société de Géographie*, 15(2), 129-160. Paris.
- Mercier, M. (1922). *La civilisation urbaine au M'Zab: Étude de sociologie africaine*. Alger: Jules Carbonel.
- Al-Farastā'ī al-Nafūsī, Abū al-'Abbās Aḥmad ibn Muḥammad ibn Bakr. (1997). *al-Qisma wa-uṣūl al-arḍīn* (2^e éd.). Ghardaia: Jam'iyat al-Turāth.
- Donnadieu, C., Donnadieu, P., Didillon, H., & Didillon, J.-M. (1977). *Habiter le désert: Les maisons mozabites. Recherches sur un type d'architecture traditionnelle transmis par la tradition orale saharienne*. Bruxelles: Pierre Mardaga. (Collection Architecture).
- Benyoucef, B. (2010). *Le M'Zab: Parcours millénaire*. Alger: Éditions Alpha.
- Bencherif, M. (2007). *La micro-urbanisation et la ville-oasis, une alternative à l'équilibre des zones arides pour une ville saharienne durable: Cas du Bas-Sahara* [Thèse de doctorat, Université de Constantine].
- Capot-Rey, R. (1953). *Le Sahara français*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Côte, M. (1993). *L'Algérie, ou l'espace retourné*. Paris: Flammarion.
- Echallier, J.-C. (1968). *Essai sur l'habitat sédentaire traditionnel au Sahara algérien* [Thèse de doctorat, Institut d'Urbanisme, Université de Paris].
- Godard, Cdt. (1954). *L'oasis moderne: Essai d'urbanisme saharien*. Alger: La Maison du Livre.
- Fall, A., Fortin, M.-J., Manseau, M., & O'Brien, D. (2007). Spatial graphs: Principles and applications for habitat connectivity. *Ecosystems*, 10(3), 448–461. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9038-7>.
- Boeing, G. (2018b). Planarity and street network representation in urban form analysis. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 47(5), 855–869. <https://doi.org/10.1177/2399808318802941>.

- Agryzkov, T., Oliver, J. L., Tortosa, L., & Vicent, J. F. (2017). *Different types of graphs to model a city* (WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 118, pp. 71–82). WIT Press. <https://doi.org/10.2495/CMEM170081>.
- Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E*, 73(3), 036125. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.036125>.
- Porta, S., Crucitti, P., & Latora, V. (2006). The network analysis of urban streets: A primal approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33(5), 705–725. <https://doi.org/10.1068/b32045>.
- Buhl, J., Gautrais, J., Reeves, N., Solé, R. V., Valverde, S., Kuntz, P., & Theraulaz, G. (2006). Topological patterns in street networks of self-organized urban settlements. *European Physical Journal B*, 49(4), 513–522. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2006-00085-1>.
- Sharifi, A. (2019). Resilient urban forms: A review of literature on streets and street networks. *Building and Environment*, 147, 171–187. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.040>.
- Añez, J., De La Barra, T., & Pérez, B. (1996). Dual graph representation of transport networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 30(3), 209–216. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(95\)00024-0](https://doi.org/10.1016/0191-2615(95)00024-0).
- Hillier, B. (1999). The hidden geometry of deformed grids: Or, why space syntax works, when it looks as though it shouldn't. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 26(2), 169–191. <https://doi.org/10.1068/b4125>.
- Jiang, B., & Claramunt, C. (2004). Topological analysis of urban street networks. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 151–162. <https://doi.org/10.1068/b306>.
- Mrvar, A., & Batagelj, V. (2016). Analysis and visualization of large networks with program package Pajek. *Complex Adaptive Systems Modeling*, 4(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s40294-016-0017-8>.
- Virkar, Y., & Clauset, A. (2014). Power-law distributions in binned empirical data. *Annals of Applied Statistics*, 8(1), 89–119. <https://doi.org/10.1214/13-AOAS710>

Chapitre 9 : Simulation morphogénétique par automates cellulaires, modèle expérimental de la complexité

« Dans toute méthode concevable jamais inventée par l'homme, un automate qui produit un objet en copiant un modèle passera d'abord du modèle à une description, puis à l'objet. Il commence par abstraire ce qu'est la chose, puis la réalise. Il est donc plus simple de ne pas extraire d'un objet réel sa définition, mais de partir directement de la définition. »

John von Neumann

« Une bonne simulation, qu'il s'agisse d'un mythe religieux ou d'une théorie scientifique, nous donne un sentiment de maîtrise sur l'expérience. Représenter quelque chose symboliquement, comme nous le faisons en parlant ou en écrivant, c'est en quelque sorte le capturer, le rendre sien. Mais avec cette appropriation vient la prise de conscience que nous avons nié l'immédiateté de la réalité et qu'en créant un substitut nous n'avons fait que tisser un nouveau fil dans la toile de notre grande illusion. »

Heinz Pagels

. Introduction

Les analyses précédentes menées dans cette recherche, fondées sur la géométrie fractale et la théorie des réseaux, ont permis de mettre en évidence l'existence de régularités formelles et d'organisations hiérarchiques dans la morphogenèse des cas d'étude algériens. Ces approches révèlent la présence d'une auto organisation inscrite dans la structure même des tissus urbains, longtemps perçus comme chaotiques ou désordonnés. Toutefois, malgré leur apport décisif, elles présentent des limites. L'analyse fractale met en évidence l'invariance d'échelle et montre comment des régularités spatiales émergent de processus auto organisés. Cependant, cette approche reste centrée sur l'identification de régularités globales et ne permet pas, à elle seule, de restituer la dynamique temporelle ni la diversité des interactions locales qui orientent concrètement l'évolution urbaine. La théorie des réseaux, en quantifiant la hiérarchie et la centralité des rues, met en évidence la structure relationnelle des espaces mais reste attachée à un instant défini. Ces deux approches décrivent et objectivent la forme urbaine, mais elles ne permettent pas, à elles seules, de saisir la dynamique temporelle ni la diversité des interactions qui guident la transformation progressive du tissu.

Dans ce contexte, le recours à la simulation par automates cellulaires constitue un apport supplémentaire. Les automates cellulaires sont des modèles expérimentés et confirmés en théories de la complexité. Elles offrent un cadre conceptuel et opérationnel permettant de reproduire les dynamiques locales de croissance urbaine à partir de règles simples, définies au niveau cellulaire et appliquées de manière itérative. Par la répétition de ces règles et les interactions de voisinage, des structures complexes et émergentes apparaissent, reflétant les logiques d'auto organisation propres aux systèmes complexes, notamment les systèmes urbains. En intégrant les contraintes topographiques ainsi que le réseau viaire déjà mobilisé dans les analyses par les fractales et les réseaux, les automates cellulaires sont susceptibles de générer la dynamique avec les évolutions historiques observées. Le choix de la Casbah d'Alger comme cas d'étude se justifie ici par sa richesse historique et politique, en tant que capitale emblématique de l'Algérie depuis l'époque ottomane, mais aussi par l'abondance et la diversité des données disponibles, qui rendent possible une simulation plus robuste et plus fiable. L'intérêt de cette approche réside ainsi dans sa capacité à passer de la simple observation des régularités morphogénétiques à une modélisation dynamique, permettant de reproduire le processus évolutif historique.

Ce chapitre s'organise en plusieurs points. Le premier présente la définition générale des automates cellulaires et leurs origines. Le second expose leurs principes fondamentaux, en insistant sur les notions de cellule, de voisinage et de règles de transition. Le troisième revient

sur leur transfert vers les sciences urbaines et les outils existants, ainsi que leurs hybridations. La quatrième section applique cette approche à l'échelle macro de la Casbah d'Alger, en précisant l'aire d'étude, les données mobilisées, les variables retenues et la méthodologie appliquée. Enfin, la dernière partie discute et interprète les résultats obtenus, en soulignant les apports, les limites et les perspectives de la simulation par automates cellulaires dans l'étude de la ville islamique traditionnelle.

1. Définition générale des automates cellulaires

Les limites des approches appliquées précédemment ont montré la nécessité d'un outil capable de restituer la dynamique temporelle et les interactions locales qui façonnent la morphogenèse urbaine. La simulation s'impose ainsi comme un prolongement naturel de ces analyses, en allant au-delà de la simple mise en évidence des régularités. C'est précisément ce rôle qu'assurent les automates cellulaires, considérés comme l'un des modèles emblématiques des sciences de la complexité. Ils offrent une formalisation à la fois simple et puissante de l'émergence de structures globales à partir de règles élémentaires appliquées localement. Avant d'en explorer les applications aux systèmes urbains et leur mise en œuvre dans le cas de la Casbah d'Alger, il importe d'en rappeler la définition générale et les principes fondateurs.

1.1. Repères conceptuels et descriptifs

Mitchell (2009, p. 147-148) définit généralement un automate cellulaire comme une grille (ou un réseau) de cellules, chaque cellule étant une unité simple qui peut s'allumer ou s'éteindre en fonction des états de son voisinage local. Une règle d'automate cellulaire, également appelée règle de mise à jour, est la même pour toutes les cellules et indique à chaque cellule quel doit être son état à l'étape de temps suivante en fonction des états actuels dans son voisinage. Bien que simple en apparence, un automate cellulaire constitue un modèle idéalisé d'un système complexe. À l'instar des systèmes complexes naturels, il est composé d'un grand nombre de composants simples (les cellules), sans contrôle central, chaque composant n'interagissant qu'avec une fraction limitée des autres. De plus, les automates cellulaires peuvent produire des comportements très complexes, difficiles, voire impossibles à prévoir à partir de la seule règle de mise à jour des cellules.

Dans une perspective additionnelle, Liu (2009, p.27-29) définit les automates cellulaires comme des machines auto-opérantes qui traitent l'information, procédant logiquement, inexorablement, en effectuant leur prochaine action après avoir appliqué les données reçues de l'extérieur selon les instructions programmées en leur sein. Un automate cellulaire se compose de cinq éléments de base :

- La cellule, qui constitue l'unité spatiale.
- L'état, c'est-à-dire l'attribut que prend la cellule.
- Le voisinage, défini comme l'ensemble des cellules en interaction.
- Les règles de transition, renvoient aux processus qui gouverne l'évolution.
- Le temps, correspondant à la mise à jour simultanée de tous les états.

L'expression générique de ces règles peut être formulée ainsi : si quelque chose se produit dans le voisinage d'une cellule, alors quelque chose arrivera à cette cellule à l'instant suivant. Formellement, l'évolution d'une cellule S_{ij}^t est décrite par la fonction :

$$S_{ij}^{t+1} = f(S_{ij}^t, \Omega_{ij}^t), \quad (9.1)$$

Où : S_{ij}^t est l'état de la cellule située à la position (i, j) à l'instant t ; Ω_{ij}^t représente les cellules voisines ; f est la fonction de transition (ou règle de mise à jour) qui détermine le nouvel état d'une cellule en fonction : de son état actuel S_{ij}^t et de l'état de son voisinage Ω_{ij}^t .

Par ailleurs Ilachinski (2001, p.3-12) propose plusieurs définitions complémentaires des automates cellulaires. Il en donne d'abord une définition générale. Un automate cellulaire (AC) est un système dynamique discret, dans lequel l'espace, le temps et les états du système sont tous discrets, et où l'évolution du système est gouvernée par des règles locales. Dans une perspective computationnelle, Ilachinski ajoute qu'un AC peut être considéré comme un ordinateur massivement parallèle, où chaque cellule effectue un calcul simple basé sur les états de ses voisines, et où le comportement global émerge de l'application synchrone de ces calculs. L'automate cellulaire devient alors une machine de calcul distribué, dans laquelle des opérations élémentaires produisent collectivement une dynamique complexe. Ilachinski élargit la définition en insistant aussi sur la dimension conceptuelle : un AC n'est rien de plus qu'un système dynamique basé sur des règles ; pourtant, en pratique, il sert de modèle général pour la complexité, l'auto-organisation et les phénomènes émergents.

Après avoir présenté un aperçu général sur les automates cellulaires, il est pertinent de se pencher sur leur historique et leurs pionniers, afin de mieux comprendre non seulement la genèse de ce modèle mais aussi les motivations et les problématiques qui ont conduit à sa formalisation. Cette exploration permet de saisir comment des concepts initialement théoriques et abstraits ont été progressivement transformés en outils analytiques puissants, capables de simuler des dynamiques complexes et d'illustrer l'émergence de comportements collectifs à partir de règles locales simples.

1.2. Origines et évolution historique

Comme présenté dans le chapitre 3, les automates cellulaires s'inscrivent dans ce que l'on peut qualifier de première génération des théories de la complexité, apparues au milieu du XX^e siècle. Cette génération a été marquée par l'émergence d'outils formels cherchant à représenter la dynamique de systèmes composés de multiples entités en interaction locale, sans recours à un contrôle centralisé. Les automates cellulaires constituent l'un des premiers modèles de ce nouveau paradigme, en offrant un cadre abstrait mais rigoureux pour penser l'auto organisation et l'émergence de formes complexes.

Liu (2009, p. 25-26) rappelle que les origines des automates cellulaires remontent aux années 1940. Alan Turing fut l'un des premiers à montrer que les ordinateurs pouvaient intégrer des règles programmées capables de se reproduire eux-mêmes. Dans le même temps, Stanislaw Ulam, à Los Alamos, utilisait un réseau en treillis simple pour étudier la croissance des cristaux. Mais c'est surtout John von Neumann qui, au sein du même laboratoire, développa un dispositif autoreproducteur dans un espace cellulaire bidimensionnel, constitué de 29 états et d'un voisinage de quatre cellules (Nord, Sud, Est et Ouest), désormais connu sous le nom de « voisinage de von Neumann ». Il démontra qu'un schéma initial pouvait se reproduire indéfiniment dans ce type d'espace.

Dans les années 1950 et 1960, les travaux de John von Neumann ont jeté les bases scientifiques de la recherche sur les automates cellulaires. Toutefois, sa machine demeurerait trop complexe pour être simulée sur les ordinateurs de l'époque. À partir des années 1970, John Conway simplifia considérablement ce modèle en créant le célèbre Jeu de la Vie. Cet automate cellulaire bidimensionnel à deux états (vivant/mort) repose sur des règles locales très simples : naissance, survie, mort par isolement ou par surpopulation. Malgré cette apparente simplicité, il engendre des motifs dynamiques tels que les « *Gliders* » et s'avère universel au sens de Turing. Le Jeu de la Vie suscita une fascination durable, tant chez les scientifiques que dans le grand public, en constituant un exemple saisissant d'émergence : à partir de règles élémentaires surgissent des structures imprévisibles, parfois persistantes (Sayama, 2015, p. 190-191).

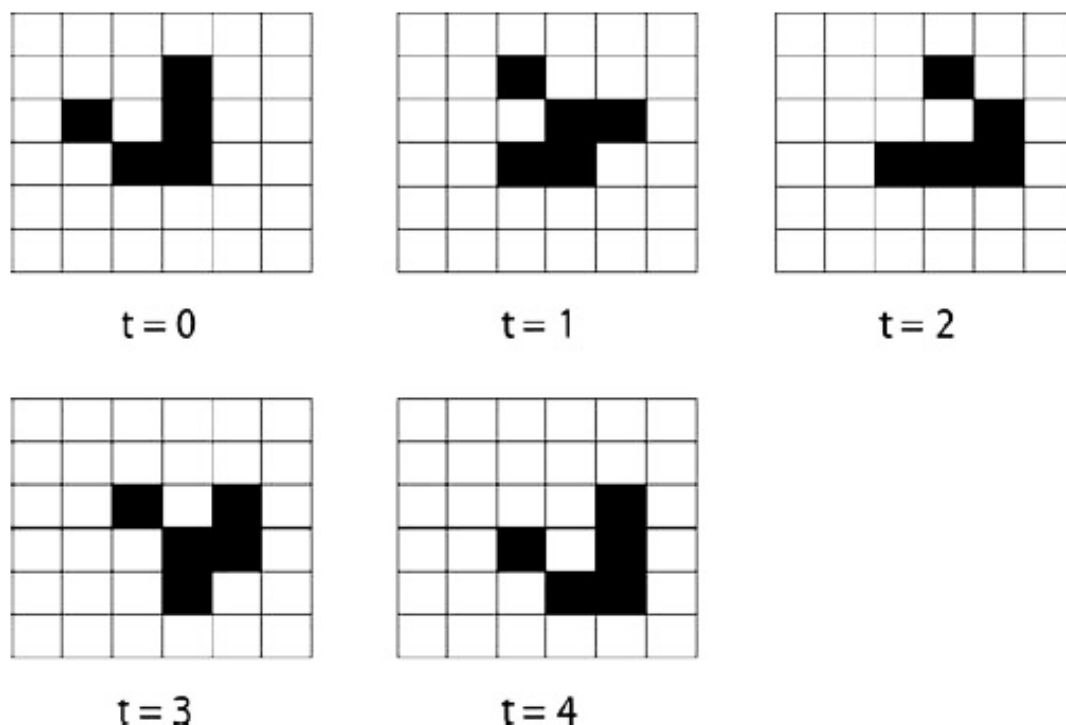


Figure 9.1. Le jeu de vie de Conway sur quatre étapes. Source : Mitchell (2009).

Dans les années 1980, Ilachinski (2001, p. 23) souligne l'apport décisif de Stephen Wolfram, qui entreprit une exploration systématique des automates cellulaires élémentaires et proposa une classification de leurs comportements dynamiques. Sous son impulsion, les automates cellulaires devinrent un champ de recherche autonome, associant rigueur scientifique et spéculation sur les lois fondamentales de la nature. Mitchell (2009, p. 151-159) confirme que ces travaux démontrent qu'un système extrêmement simple peut engendrer une complexité computationnelle illimitée. Elle discute également des prolongements modernes, notamment l'ouvrage de Wolfram, *A New Kind of Science* (2002), où il avance l'hypothèse selon laquelle les lois fondamentales de l'univers pourraient être assimilées à des automates cellulaires. Bien que cette proposition demeure controversée, elle illustre la puissance conceptuelle des automates cellulaires en tant que modèles paradigmatiques de la complexité : des règles locales simples, sans contrôle central, générant des comportements globaux imprévisibles. Mitchell en souligne toutefois les limites : l'analyse des structures émergentes repose souvent sur une interprétation externe, et les automates cellulaires, à eux seuls, ne sauraient constituer une théorie générale de la complexité.

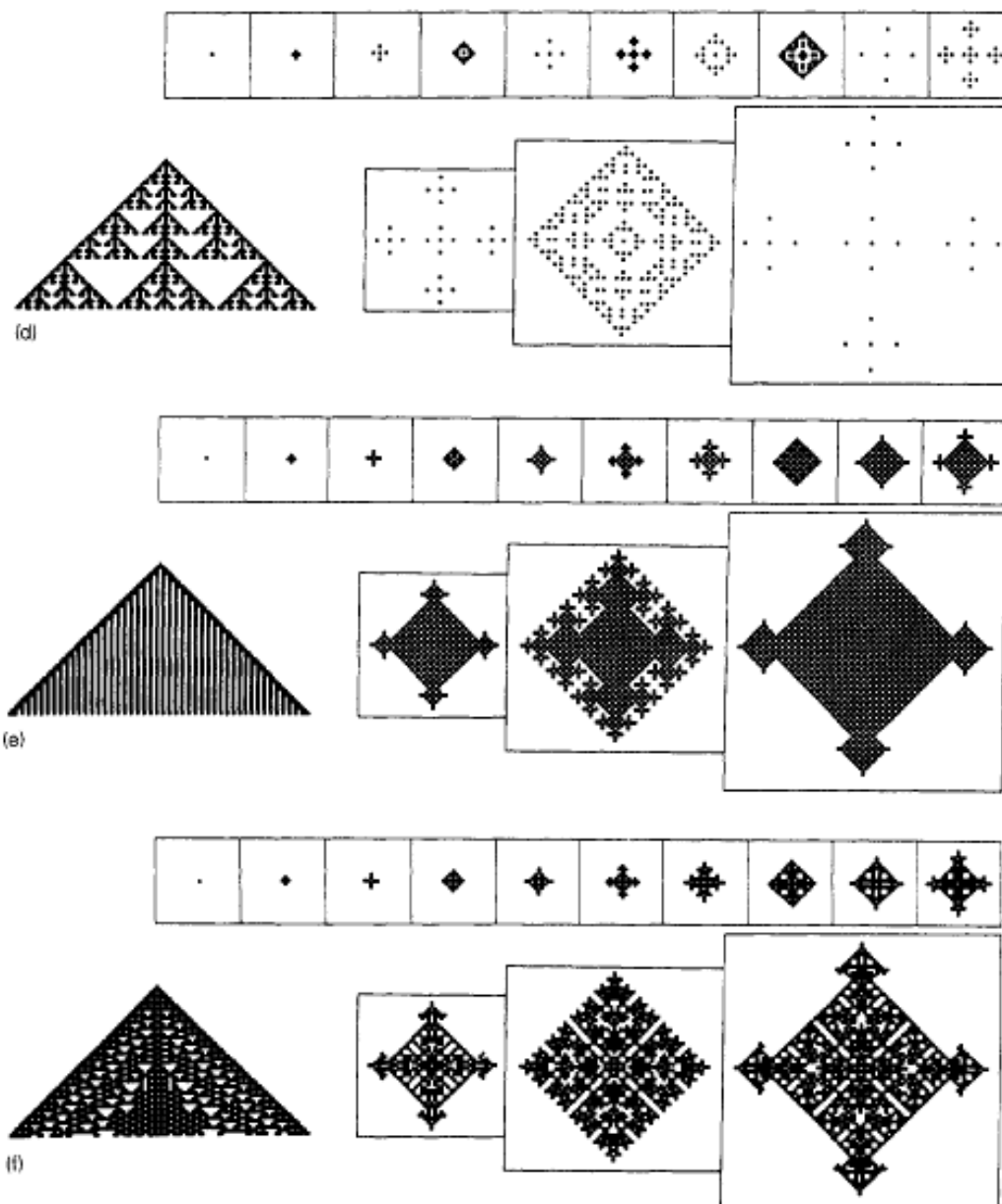


Figure 9.2. Exemples de classes de patterns générés par l'évolution d'automates cellulaires. Source : Wolfram (2018).

1.3 Automates cellulaires et complexité

Au-delà de leur définition formelle, les automates cellulaires prennent tout leur sens lorsqu'ils sont replacés dans le cadre théorique des sciences de la complexité. Dans cette perspective, Mitchell (2009, p. 157-159) les présente comme un modèle paradigmatique des systèmes complexes, en les rapprochant de systèmes naturels tels que le cerveau ou le système immunitaire, où des unités simples interagissent localement pour produire des comportements collectifs sophistiqués. Les automates cellulaires ne sont donc pas de simples dispositifs computationnels, mais des modèles conceptuels mobilisés pour analyser la dynamique émergente dans des domaines variés, de la biologie à l'économie. Leur intérêt réside avant tout dans leur capacité à illustrer deux principes centraux de la complexité, l'auto-organisation et l'émergence, en montrant comment des interactions locales élémentaires peuvent engendrer

des structures globales. C'est précisément cette propriété qui fonde leur pertinence pour l'étude des différents systèmes, notamment les systèmes urbains.

Dans la prolongation de cette démarche, Sayama (2015, 185-190) situe les automates dans le champ des recherches sur la formation de motifs « *Pattern formation* », l'un des piliers de la science des systèmes complexes. Conçus pour explorer des phénomènes tels que l'auto organisation, les automates cellulaires se trouvent ainsi placés au cœur des questionnements relatifs à l'émergence. Sayama les définit comme des systèmes dynamiques distribués, discrets en espace et en temps, où chaque cellule évolue en fonction de son voisinage selon une règle de transition locale commune. Ces règles, bien que simples, produisent des comportements globaux non linéaires et souvent imprévisibles, illustrant directement la notion d'émergence à travers l'apparition de structures stables, ou de configurations mobiles comme les « *Gliders* ». Ces propriétés témoignent de la capacité des automates cellulaires à générer une complexité macroscopique à partir d'interactions microscopiques élémentaires.

Étroitement liée à l'émergence, l'auto organisation désigne la capacité d'un système à générer une structure cohérente sans recourir à un contrôle centralisé, uniquement à partir d'interactions locales entre ses composants. Les automates cellulaires en offrent une démonstration pertinente : chaque cellule ne suit qu'une règle simple, mais la répétition de ces interactions élémentaires suffit à produire des formes collectives organisées. Cette logique d'auto organisation trouve un parallèle direct dans le fonctionnement des villes. Comme le soulignent White et al. (2015, p. 1-3), les formes urbaines se génèrent elles-mêmes, non par l'application d'un plan global, mais comme le résultat agrégé d'innombrables décisions locales, souvent non coordonnées, qui finissent par produire une structure d'ensemble. La ville apparaît ainsi comme un système adaptatif et autoorganisé, où l'ordre spatial résulte spontanément des interactions locales, à l'image de la dynamique observée dans les automates cellulaires. L'intérêt des automates cellulaires pour l'étude de la morphogenèse urbaine s'inscrit directement dans cette double logique d'auto organisation et d'émergence. Comme dans une grille d'automate cellulaire, la ville résulte d'une multitude de décisions et d'interactions locales : aménagements parcellaires, constructions individuelles, règles coutumières, pratiques sociales et contraintes environnementales. Ces actions, bien que limitées et localisées, produisent collectivement une organisation globale cohérente, souvent sans plan directeur explicite.

Les automates cellulaires se situent donc à la croisée de la théorie et de la méthode. Ils constituent à la fois un modèle conceptuel permettant d'illustrer les principes fondateurs de la complexité, auto-organisation et émergence, et un outil de simulation des dynamiques urbaines. Leur application à l'étude de la morphogenèse permet de dépasser les approches descriptives ou déterministes de la ville, en mettant en évidence le rôle des interactions locales dans la production de structures globales complexes.

2. Principes fondamentaux

Après avoir présenté leur définition générale et leur évolution historique, il convient désormais de préciser les principes fondamentaux des automates cellulaires. Ces principes, qui reposent sur cinq éléments de base : la cellule, l'état, le voisinage, les règles de transition et le temps, constituent l'ossature conceptuelle de ce modèle. Leur explicitation permet de

comprendre comment, à partir d'unités simples et d'interactions locales, émergent des dynamiques complexes et organisées. Ainsi ces éléments peuvent être définis comme :

- **La cellule**, selon Liu (2009, p. 28), la cellule constitue l'unité spatiale de base dans un espace cellulaire. Les cellules dans un automate cellulaire sont disposées selon une tessellation spatiale. La forme la plus courante est une grille bidimensionnelle de cellules, utilisée notamment pour la modélisation de la croissance urbaine et du changement d'occupation du sol. Cependant, d'autres organisations existent, comme les automates cellulaires unidimensionnels, qui ont été développés pour représenter des objets linéaires tels que la modélisation du trafic urbain.
- **L'état**, Ilachinski (2001, p. 5-6) définit l'état comme l'attribut ou la condition qu'une cellule peut prendre à un moment donné. Chaque cellule dispose d'un ensemble fini d'états possibles, généralement représentés par des valeurs discrètes comme 0 et 1 dans le cas le plus simple. L'état traduit ainsi la position ou la configuration instantanée de la cellule. Au cours de l'évolution d'un automate cellulaire, l'état de chaque cellule est mis à jour simultanément avec celui des autres cellules, en fonction de la règle locale appliquée à son voisinage. Autrement dit, l'état constitue l'élément de base permettant de décrire la dynamique du système, puisqu'il exprime la valeur que prend la cellule dans un univers entièrement discret.
- **Le voisinage**, Mitchell (2009, p. 147-151) explique que le fonctionnement d'un automate cellulaire repose sur la notion de voisinage, défini comme l'ensemble des cellules dont l'état influence celui d'une cellule donnée à l'étape suivante. Elle précise que plusieurs types de voisinages peuvent être employés : le voisinage de von Neumann, constitué des quatre cellules adjacentes orthogonalement (haut, bas, gauche, droite), et le voisinage de Moore, qui inclut ces quatre voisines ainsi que les diagonales, soit huit cellules au total. Mitchell souligne que ce choix de voisinage est fondamental car il conditionne les règles de transition et donc la dynamique globale du système.
- **Les règles de transition**, Sayama (2015, p. 187-189) explique qu'une règle de transition est une fonction appliquée uniformément et simultanément à toutes les cellules. Cette fonction associe un nouvel état à chaque cellule en fonction de son état actuel et de celui de son voisinage. Elle peut être représentée de différentes manières : sous forme de table de correspondance, d'une formule mathématique explicite, ou encore d'un algorithme plus abstrait. Certaines règles présentent des symétries, par exemple la symétrie rotationnelle, quand les situations équivalentes par rotation produisent le même résultat. Dans ce cas, les automates peuvent être qualifiés de totalistes, si la règle dépend uniquement de la somme des états dans le voisinage.
- **Le temps**, est incrémenté par étapes discrètes. L'évolution d'un automate cellulaire se fait par la mise à jour simultanée (synchronisée) de l'état de toutes les cellules. L'état du système à l'instant $t+1$ dépend uniquement de l'état du système à l'instant t . Ainsi, la dimension temporelle dans les automates cellulaires est représentée comme une séquence d'itérations discrètes (Liu, 2009, p. 29).

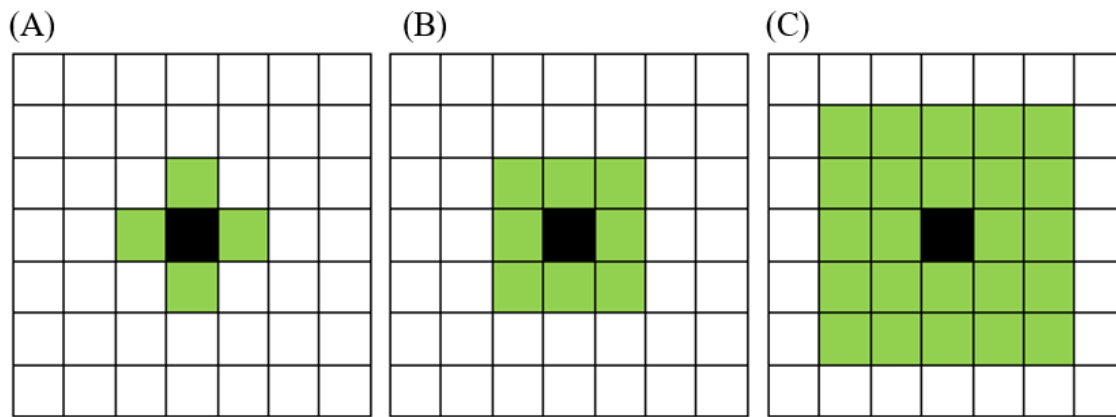


Figure 9.3. Voisinage en automates : (A) Cellules de Von Neumann ; (B) et (C) cellules de Moore. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Voisinage_de_Moore, consulté en Aout 2024.

En somme, ces cinq éléments : la cellule, l'état, le voisinage, les règles de transition et le temps, constituent le socle conceptuel des automates cellulaires. Pris isolément, chacun d'eux paraît relativement simple ; mais c'est précisément leur combinaison et leur interaction qui confèrent à ce modèle sa puissance explicative. En articulant espace discret, dynamiques locales et évolutions itératives, les automates cellulaires offrent un cadre formel permettant de comprendre comment des structures complexes émergent de processus élémentaires. Cette conceptualisation prépare ainsi le terrain pour explorer, dans la suite, l'application de ces principes dans les études urbaines ouvrant la voie à une compréhension renouvelée des processus de croissance, de transformation et d'auto organisation des villes.

3. Transfert et applications des automates cellulaires en études urbaines

Bien que les principes fondamentaux des automates cellulaires trouvent leur origine dans une formalisation abstraite et mathématique, leur portée dépasse largement le cadre théorique et conceptuel. Ils constituent en effet un outil opérationnel pour l'analyse de phénomènes concrets, et se révèlent particulièrement pertinents dans le champ urbain, où la croissance, la transformation et l'organisation des tissus résultent d'interactions locales et d'adaptations progressives.

Aujourd'hui, on assiste à une multiplication des applications des automates cellulaires dans le champ des études urbaines, particulièrement autour de la question de la croissance et de la dynamique morphologique des villes. En effet, Tong et Feng (2020) soulignent que ces modèles ont été largement mobilisés pour simuler l'expansion urbaine et l'étalement périurbain, en mettant en évidence les mécanismes qui conduisent à l'occupation progressive de l'espace. Ils permettent également d'analyser les processus de densification dans les centres, de fragmentation des tissus en périphérie ou de transformation des usages du sol dans le cadre de la métropolisation. Plusieurs travaux se sont attachés à explorer la relation entre croissance urbaine et facteurs environnementaux, tels que la topographie, l'hydrographie ou la présence d'infrastructures, afin de comprendre comment ces contraintes physiques orientent les trajectoires de développement. D'autres recherches ont intégré des dimensions socio-économiques et institutionnelles, en examinant l'impact des politiques d'aménagement, des logiques foncières ou encore des dynamiques démographiques sur les rythmes et les formes de la croissance. Qu'il s'agisse de villes nord-américaines, européennes, asiatiques ou africaines, les automates cellulaires ont ainsi été utilisés pour simuler et comparer des

scénarios d'évolution, fournissant aux chercheurs comme aux décideurs un outil opérationnel pour anticiper les formes d'urbanisation futures.

Si cette abondance d'applications est manifeste aujourd'hui, Liu (2009, p. 36-37) rappelle que l'usage des automates cellulaires en lien avec les systèmes urbains trouve ses racines historiques dès les années 1950. Les premiers modèles de diffusion spatiale, tels que celui de Hägerstrand en 1952, ainsi que les modèles de réseaux de peuplement proposés par Morrill en 1965, reposaient déjà sur l'idée d'un effet de voisinage, principe fondamental des automates cellulaires. Dans les années 1960, des approches plus explicitement fondées sur des grilles cellulaires furent développées, notamment les travaux de Lathrop et Hamburg de 1965, qui annonçaient déjà l'intégration future des automates cellulaires dans la modélisation urbaine contemporaine.

Les travaux décisifs dans l'application des automates cellulaires aux études urbaines et géographiques furent ceux de Tobler (1979). Dans son article fondateur, il propose de représenter l'espace géographique sous forme de grilles régulières, où chaque cellule évolue selon des règles de transition définies. Il distingue plusieurs types de modèles, allant du plus simple, où le changement est aléatoire ou dépend uniquement de l'état passé d'une cellule, au plus complexe, où l'évolution d'une cellule est conditionnée par ses voisines. Ce dernier cas constitue le modèle géographique, qui formalise sa célèbre première loi de la géographie : tout est lié, mais les proches le sont davantage. Tobler met ainsi en avant l'intérêt de cette approche cellulaire pour modéliser la dynamique spatiale, notamment l'urbanisation ou l'usage du sol, en soulignant à la fois sa simplicité formelle, sa puissance de simulation, mais aussi ses limites face à la complexité des phénomènes réels.

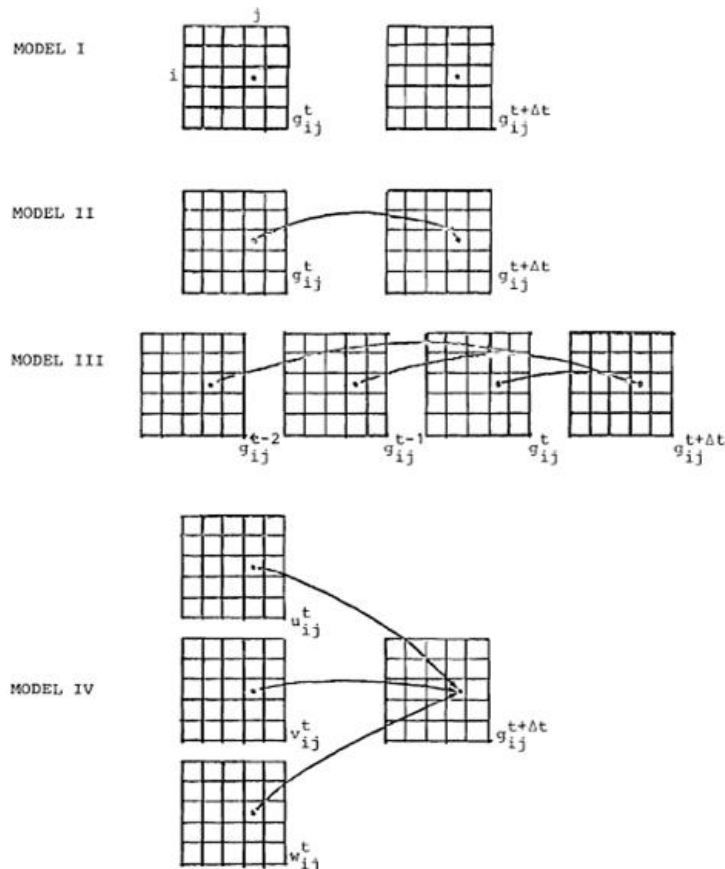


Figure 9.4. Illustration graphique des modèles en AC utilisant une grille de 25 cellules. Source : Tobler (1979).

Dans la même perspective, Couclelis (1985), propose un cadre théorique pour comprendre comment des règles locales simples, appliquées à des unités élémentaires (les cellules), peuvent générer des structures et dynamiques complexes à l'échelle globale. Elle montre que ce type de modélisation constitue un outil puissant pour explorer les relations micro-macro, particulièrement en géographie, en urbanisme et en sciences sociales, où les comportements individuels donnent naissance à des phénomènes collectifs tels que la croissance urbaine, la ségrégation ou la diffusion spatiale. L'article souligne le potentiel heuristique de cette approche pour l'étude des processus émergents, tout en rappelant les limites liées aux simplifications et à la nécessité d'un ancrage empirique rigoureux.

3.1. Modélisation et simulation des dynamiques urbaines

La ville est un système en constante transformation, façonné non seulement par sa croissance spatiale mais aussi par des processus de densification, de mutation fonctionnelle et de réorganisation des réseaux. Plutôt que de parler uniquement de croissance, il est donc plus pertinent d'évoquer des dynamiques urbaines. La modélisation permet d'explorer ces processus en mettant l'accent sur les mécanismes génératifs plutôt que sur les formes finales. Les automates cellulaires offrent un cadre particulièrement adapté.

Les automates cellulaires occupent une place centrale dans la modélisation et la simulation des dynamiques urbaines en tant que systèmes complexes, car ils permettent de représenter la manière dont des processus locaux simples donnent naissance à des structures globales émergentes. White et al. (2015, p. 3-15) rappellent que cette capacité correspond étroitement au caractère auto organisé des villes, qui ne résultent pas d'un plan unique mais d'une multitude d'interactions locales. Contrairement à d'autres approches classiques, les AC sont intrinsèquement spatiaux. Cette capacité permet de simuler directement l'évolution des états locaux en interaction, tout en restant computationnellement efficace, ce qui explique la diffusion rapide de l'approche dans la recherche urbaine depuis les années 1990.

Dans cette expansion des années 1990 apparaissent les deux articles de White et Engelen (1993 ; 1997) qui marquent deux étapes complémentaires dans l'intégration des automates cellulaires à la modélisation urbaine. Le premier, propose un modèle exploratoire visant à montrer que les processus simples d'occupation de l'espace génèrent des formes urbaines fractales, irrégulières et hiérarchiques, proches de celles observées dans la réalité. Il s'agit d'une contribution théorique qui met en évidence l'auto organisation et la fractalité comme caractéristiques fondamentales de la morphogenèse urbaine, mais qui reste limité par son abstraction et l'absence de contraintes spatiales concrètes. Le second, constitue un prolongement opérationnel : les auteurs y intègrent des contraintes physiques (relief, sols), institutionnelles (zones protégées, règles de planification) et socio-économiques (accessibilité, attracteurs), afin de produire des simulations plus réalistes du changement d'usage du sol à haute résolution. Cette évolution marque le passage d'un modèle conceptuel à un outil de planification territoriale, tout en posant la question de la dépendance aux données et à la calibration. Pris ensemble, ces deux articles illustrent la trajectoire méthodologique de la recherche sur la complexité urbaine : de la démonstration théorique de l'auto organisation fractale à l'élaboration d'un instrument d'aide à la décision pour l'urbanisme.

Parallèlement, les travaux de Batty et Xie (1994 ; 1997) constituent une contribution majeure à l'introduction des automates cellulaires dans les études urbaines. Dans le premier article, les auteurs développent une réflexion conceptuelle en établissant le parallèle entre

cellules et villes : à partir de règles locales simples, des structures urbaines complexes émergent, offrant un cadre épistémologique nouveau face aux limites des modèles traditionnels, trop déterministes ou agrégés. Ce texte prépare ainsi le terrain en montrant que la ville peut être comprise comme un système complexe et auto organisé. Trois ans plus tard, dans le deuxième article ils approfondissaient cette perspective en la traduisant sur un plan méthodologique : les auteurs y proposent une typologie d'automates cellulaires adaptés aux dynamiques urbaines, en explorant différentes règles de transition et leur impact sur les formes spatiales simulées. Ensemble, ces travaux marquent une étape décisive dans l'évolution de la géographie computationnelle, en articulant fondements théoriques et expérimentations, et en ouvrant la voie à une modélisation de la morphogenèse urbaine inspirée de la complexité, malgré des applications empiriques encore limitées à des démonstrations de faisabilité.

Dans une perspective complémentaire, Clarke et ses collaborateurs marquent une étape clé dans l'évolution de l'usage des automates cellulaires en études urbaines. Premièrement, Clarke et al. (1997) proposent un modèle auto-modifiant capable d'ajuster dynamiquement ses règles de croissance afin de reproduire l'expansion urbaine historique de la baie de San Francisco, démontrant la pertinence des automates cellulaires pour simuler des patterns urbains réalistes à partir de règles locales simples. Deuxièmes, Clarke et Gaydos (1998) franchissent une étape supplémentaire en couplant les automates aux systèmes d'information géographique (SIG), ce qui permet d'intégrer de vastes ensembles de données spatiales et d'orienter le modèle vers la prédiction prospective de la croissance urbaine. Ensemble, ces travaux assurent la transition entre une phase exploratoire, centrée sur la reproduction historique et la validité scientifique du modèle, et une phase opérationnelle, tournée vers la planification et l'aide à la décision, tout en montrant les forces (flexibilité, capacité d'émergence) et les limites (sensibilité aux données, faible prise en compte des dynamiques socio-économiques) des approches cellulaires appliquées à la morphogenèse urbaine.

3.2. Hybridation avec d'autres modèles

Bien que les automates cellulaires se révèlent particulièrement puissants pour modéliser les dynamiques urbaines et l'émergence de structures urbaines complexes, leur application isolée présente différentes limites. En effet, leur représentation spatiale reste souvent stylisée, leur calibration peut dépendre fortement des données disponibles, et ils ne prennent pas toujours en compte la diversité des interactions topologiques, fonctionnelles ou socio-économiques qui influencent la morphogenèse urbaine. Pour pallier ces limites et enrichir la modélisation, les automates cellulaires sont fréquemment hybridés avec d'autres approches méthodologiques, ce qui permet de combiner la puissance de la simulation locale avec la précision des données réelles et l'analyse des structures complexes.

Le couplage des automates cellulaires avec les systèmes d'information géographique (SIG) constitue aujourd'hui l'une des hybridations les plus largement utilisées dans la modélisation urbaine, et son développement a commencé dès les années 1990 avec l'évolution rapide des automates dans les études urbaines. White et al. (2015, p. 59-63) confirment que cette combinaison méthodologique permet de dépasser les limites des AC purs, dont la représentation spatiale reste souvent simplifiée et abstraite, en intégrant des données spatiales détaillées et hétérogènes telles que la topographie, les réseaux viaires et de transport, les

limites foncières et de zonage, les infrastructures existantes, ainsi que des informations environnementales comme l'hydrographie ou les zones protégées. Elle améliore la précision spatiale des simulations, en rendant possible l'évolution des cellules en fonction de contraintes réelles et de caractéristiques géographiques précises : certaines zones peuvent être rendues inconstructibles pour des raisons topographiques ou environnementales, tandis que d'autres se développent selon leur accessibilité et leur proximité avec des infrastructures. Cette approche confère aux simulations un caractère historique et réaliste, capable de reproduire l'évolution effective des tissus urbains. Par ailleurs, le couplage AC-SIG permet la calibration et la validation des modèles à partir de données empiriques issues d'images satellites, d'orthophotographies ou de cartes topographiques, comparant les scénarios simulés avec l'évolution réelle sur plusieurs décennies et améliorant la robustesse des prédictions. Il favorise également la modélisation multi-échelle, les AC simulant les interactions locales et dynamiques microscopiques tandis que les SIG offrent une vision macroscopique de la ville et de ses infrastructures, permettant de relier processus locaux et contraintes globales.

Parallèlement, l'hybridation des automates cellulaires avec les concepts fractals offre un cadre analytique complémentaire particulièrement adapté à l'étude des formes urbaines complexes. Les fractales permettent de représenter et de mesurer l'autosimilarité et la hiérarchie spatiale des tissus urbains, caractéristiques essentielles des villes autoorganisées, où des motifs se répètent à différentes échelles. Les travaux pionniers de White et Engelen (1993 ; 1994) ainsi que de Batty (2005) ont montré que l'intégration de principes fractals dans les AC permet de reproduire des structures urbaines irrégulières mais ordonnées, révélant les régularités émergentes à l'échelle locale et leur traduction dans l'organisation globale de la ville. En combinant les AC avec des principes fractals, il devient possible de créer des modèles dits « *fractalized* », capables de simuler la croissance urbaine tout en mettant en évidence le lien direct entre dynamique locale et forme globale : les interactions simples des cellules, itérativement appliquées, produisent des motifs fractals. Ces modèles facilitent également la quantification de la complexité morphologique des villes, en mesurant la dimension fractale des structures générées et en comparant ces valeurs à celles des tissus existants, offrant ainsi une méthode rigoureuse pour calibrer et valider les simulations. Ce couplage permet non seulement de simuler la croissance urbaine de manière réaliste, mais aussi de comprendre comment des règles locales simples peuvent engendrer, à travers l'auto-organisation, des motifs spatiaux hiérarchisés et persistants à plusieurs échelles, illustrant pleinement le potentiel des AC dans l'analyse de la morphogenèse urbaine.

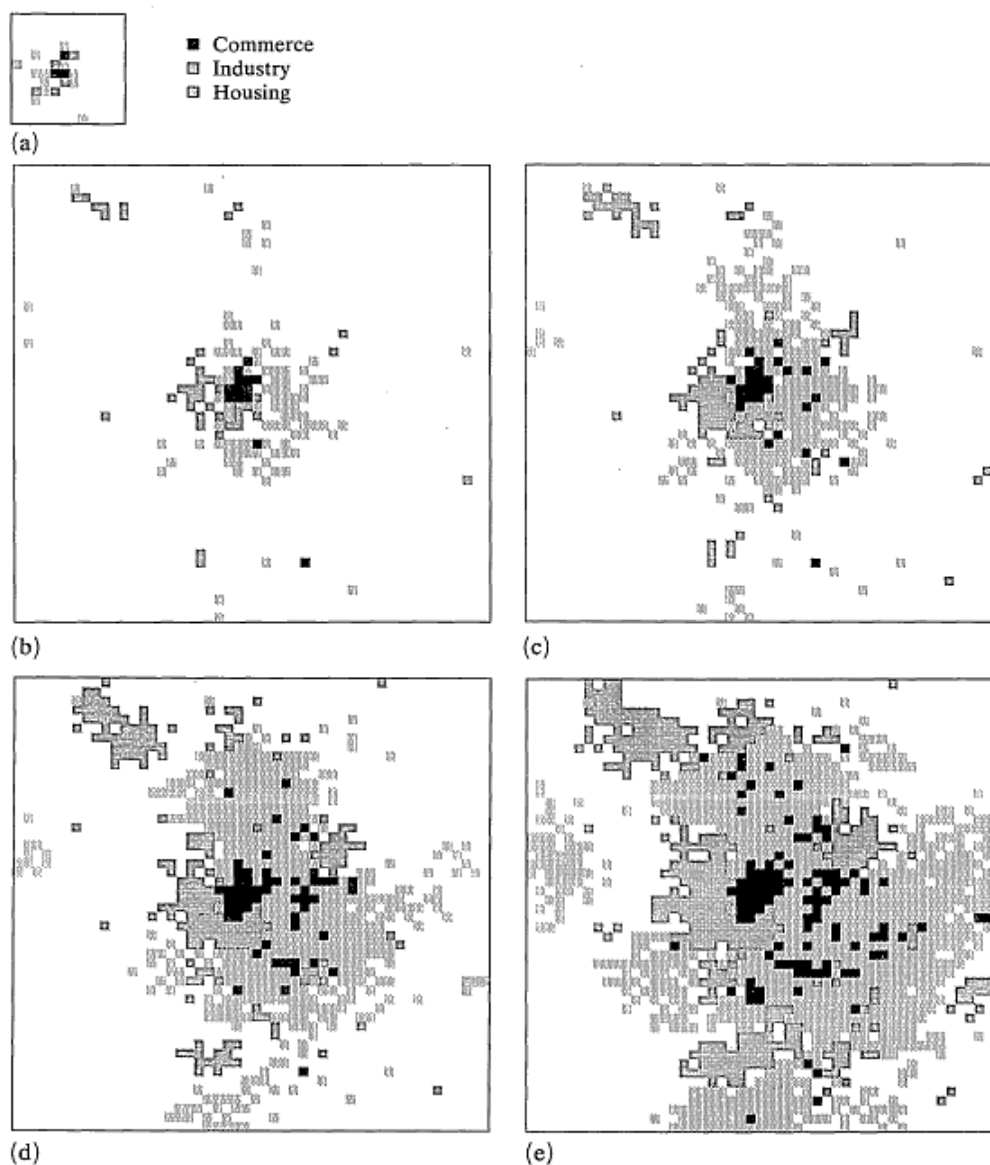


Figure 9.5. Étapes de la croissance d'une ville cellulaire. Source : White et Engelen (1993).

La combinaison des automates cellulaires avec la théorie des réseaux constitue un autre axe majeur de l'hybridation méthodologique dans l'étude des dynamiques urbaines. En intégrant les relations topologiques, hiérarchiques et fonctionnelles du réseau viaire aux interactions locales des cellules, cette approche permet de représenter la manière dont la structure spatiale influence et contraint la croissance urbaine, et réciproquement, comment l'évolution des tissus urbains modifie la configuration du réseau. Les travaux de O'Sullivan (2000) ont montré que l'analyse des flux et de la connectivité dans les réseaux viaires, couplée à des modèles locaux de simulation, fournit une compréhension plus fine des interactions micro-macro qui gouvernent la morphogenèse urbaine. De son côté, Moreno Sierra (2009) a souligné l'importance de considérer la hiérarchie et la centralité des voies dans les modèles de croissance urbaine, démontrant que les configurations locales du réseau peuvent conditionner la densité, la forme et la répartition des activités à l'échelle de la ville. L'hybridation AC-réseaux permet ainsi d'étudier la co-émergence des formes et des fonctions urbaines au sein de systèmes autoorganisés, où les décisions locales des agents et les

contraintes topologiques interagissent pour produire des structures complexes globales. Ce couplage enrichit les modèles cellulaires classiques en introduisant une dimension relationnelle et fonctionnelle, complémentaire à la simple dynamique spatiale, et facilite l'exploration de scénarios de développement urbain réalistes, intégrant à la fois la morphologie, l'accessibilité et la hiérarchie des flux.

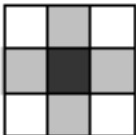
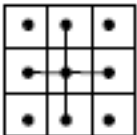
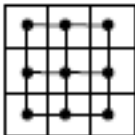
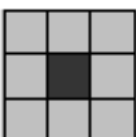
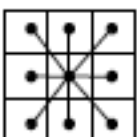
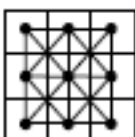
	Représentation classique	Graphe de voisinage	Graphe de relations
Voisinage de Von Neumann			
Voisinage de Moore			

Figure 9.6. Représentation des automates cellulaires et des graphes associés. Source : Moreno Sierra (2009).

Enfin, les modèles de changement d'occupation du sol (LULC) constituent un complément empirique essentiel aux automates cellulaires. En intégrant des données historiques et contemporaines, issues de la télédétection, des relevés cadastraux ou des statistiques foncières, ces modèles permettent de représenter de manière précise les évolutions spatiales passées et actuelles des usages du sol. Couplés aux automates cellulaires et aux systèmes d'information géographique (SIG), ils offrent la possibilité de simuler la dynamique des tissus urbains selon différents scénarios, en tenant compte à la fois des contraintes naturelles, des infrastructures existantes et des politiques d'aménagement (Tong et Feng, 2020 ; Wang et al., 2021 ; Garcia-Alvarez et al., 2022 ; Xu et al., 2023). Cette hybridation renforce la capacité prédictive des modèles, car elle fournit des informations empiriques robustes pour calibrer les règles locales de transition et valider les simulations, tout en conservant la logique fondamentale des automates cellulaires, centrée sur les interactions locales et l'évolution itérative. L'intégration des données LULC et SIG permet de simuler la morphogenèse urbaine, d'évaluer l'impact de diverses interventions, et d'améliorer la compréhension historique des structures urbaines, notamment des villes islamiques traditionnelles.

3.3. Application en ville islamique traditionnelle ?

L'application des automates cellulaires à l'étude des villes islamiques traditionnelles, soulève la question de leur pertinence pour comprendre la morphogenèse de ces systèmes urbains complexes. Ces villes se caractérisent par un tissu dense, hiérarchisé et irrégulier, résultat de processus d'auto organisation à long terme. Les AC permettent de traduire les interactions locales entre cellules spatiales en évolutions globales du bâti et du réseau viaire, chaque cellule évoluant selon des règles de transition prenant en compte contraintes topographiques, fonctionnelles et sociales. Le voisinage capture les interactions locales générant des motifs émergents, révélant la formation de rues principales et secondaires, de clusters fonctionnels et de structures cohérentes typiques de la ville islamique traditionnelle. L'intégration de données historiques et contemporaines, issues de cartes anciennes, relevés fonciers ou images

satellitaires, permet de calibrer le modèle et de simuler la morphogenèse sur plusieurs périodes. Cette approche montre comment les AC et la théorie de la complexité permettent de relier règles locales et organisation globale du tissu urbain, tout en soulignant la complémentarité entre modélisation formelle et données empiriques pour l'analyse de ces formes urbaines traditionnelles.

4. Simulation morphogénétique de la casbah d'Alger à l'échelle macro

Comme présenté dans les chapitres précédents (4, 5, et 8), les villes islamiques traditionnelles présentent des caractéristiques typiques des formes urbaines organiques, résultant de principes liés à des influences naturelles, socioculturelles et religieuses. Leur évolution a donné naissance à des tissus urbains denses, complexes et adaptatifs. La compréhension de ces processus morphogénétiques requiert des outils analytiques capables de modéliser l'interaction entre les facteurs naturels (par ex. pentes et élévation) et les composantes de la structure urbaine (par ex. le réseau viaire), une interaction qui produit une organisation spatiale bien définie et une forme d'ensemble. Dans cette perspective, la modélisation spatiale s'impose comme un levier méthodologique central.

La Casbah d'Alger a déjà été analysée dans cette recherche à travers les approches fractales et la théorie des réseaux, ce qui a permis de mettre en évidence ses régularités formelles, sa hiérarchie et sa structure complexe. Ces travaux préliminaires justifient son choix comme cas d'étude pour l'application des automates cellulaires, en raison à la fois de la richesse morphologique de ce tissu urbain et de la disponibilité de données historiques permettant de produire des simulations robustes et comparables à la réalité. L'étude de la morphogenèse urbaine de la Casbah à l'échelle macro constitue ainsi une application concrète des principes des automates cellulaires et de la théorie de la complexité développés précédemment. Cette simulation vise à analyser comment les interactions locales entre unités spatiales simples peuvent générer, à travers des règles de transition adaptées, des structures globales observables dans le tissu urbain historique. La Casbah, avec son tissu organique, illustre parfaitement un système urbain autoorganisé, où la morphologie résulte d'une accumulation de décisions locales, de contraintes topographiques et de pratiques sociales sur plusieurs siècles.

À cette échelle macro, l'objectif est de reproduire et de visualiser les grandes tendances de croissance et d'organisation spatiale, telles que la formation des axes principaux et secondaires, la structuration des clusters fonctionnels. La simulation repose sur un paramétrage des automates cellulaires intégrant à la fois les contraintes historiques et géographiques de la Casbah, ainsi que les interactions locales entre cellules, afin de générer des motifs émergents. Cette approche permet non seulement de tester la pertinence des modèles conceptuels de complexité et d'auto-organisation dans le contexte urbain, mais aussi de créer un outil analytique capable de relier les dynamiques locales aux configurations globales de la ville traditionnelle. Ainsi, la simulation morphogénétique à l'échelle macro ouvre la voie à une compréhension renouvelée de la dynamique historique de la Casbah, en offrant une représentation synthétique des mécanismes générateurs de sa forme urbaine, tout en préparant le terrain pour des analyses plus fines à l'échelle micro ou méso scopique.

Comme expliqué précédemment, les modèles LULC sont récemment devenus une application pertinente des modèles hybrides dans le domaine des études urbaines. Plusieurs outils basés sur les automates cellulaires, souvent couplés à d'autres modèles, ont été développés pour simuler les dynamiques urbaines. En intégrant modèles spatiaux, données environnementales et variables socio-économiques, ces outils permettent d'analyser l'évolution urbaine. Bien que ces modèles aient été principalement appliqués aux tissus urbains contemporains, leur utilisation dans le contexte des villes islamiques traditionnelles ouvre de nouvelles perspectives sur l'organisation spatiale, révélant comment l'interaction entre facteurs naturels et humains peut générer des formes urbaines cohérentes et significatives. Le tableau 9.1 présente une vue comparative de quatre outils clés dans ce domaine : SLEUTH, CA Markov, GeoSOS-FLUS, et MOLUSCE, en mettant en évidence leurs approches respectives, leurs atouts, leurs limites, leurs environnements logiciels et leurs principales références.

Tableau 9.1. Comparaison des modèles hybrides en LULC : méthodes, performances et limites. Source : auteur

Modèle	Approche	Environnement logiciel	Points forts	Limites	Références
SLEUTH	Automates cellulaires, règles de croissance urbaine	Logiciel autonome (C++), compatible SIG via ArcGIS	Spécialisé dans l'expansion urbaine, cadre de calibration robuste	Calibration complexe, catégories d'occupation du sol limitées	Clarke (2008) ; Chaudhuri et Clarke (2013)
CA-Markov	Automates cellulaires, chaînes de Markov	TerrSet, anciennement IDRISI, logiciel SIG propriétaire	Forte base statistique, matrices de transition détaillées	Licence commerciale requise, extensibilité limitée	Ghalehtimouri et al. (2022) ; Azabdaftari et Sunar (2024)
GeoSOS-FLUS	Automates cellulaires, réseaux de neurones artificiels	Logiciel autonome, faisant partie du système de simulation et d'optimisation géographique (GeoSOS)	Puissantes capacités de simulation, gère les interactions environnementales complexes	Nécessite des compétences de programmation avancées	Liu et al., 2017 ; Wang et al., 2022
MOLUSCE (Modelling Land Use Change)	Automates cellulaires, régression logistique, réseaux de neurones artificiels	QGIS, plugin open-source	Accessible, combine des méthodes statistiques et d'apprentissage automatique	Nécessite des données d'entrée de haute qualité, performances limitées pour les simulations à l'échelle régionale	Abbas et al. 2021 ; Muhammad et al., 2022

Parmi les outils comparés, MOLUSCE se distingue par son accessibilité et la flexibilité de son cadre de modélisation. Il combine la régression logistique (LR), les réseaux de neurones artificiels (ANN) et les automates cellulaires (AC) afin de simuler les transitions d'occupation du sol à partir de données raster (Abbas et al., 2021 ; Muhammad et al., 2022). Conçu pour soutenir une analyse spatiale empirique, le modèle permet de modéliser les changements d'occupation du sol entre deux dates et de projeter des transformations futures. Il s'appuie sur des variables explicatives telles que la pente, l'altitude ou les réseaux de rues, particulièrement pertinentes pour la morphologie des villes islamiques traditionnelles. MOLUSCE offre également la possibilité de comparer plusieurs algorithmes sur un même jeu de données et d'évaluer leur performance à l'aide d'indicateurs tels que la matrice de confusion ou l'indice de Kappa (Chettry et Surawar, 2021 ; Alshari et Gawali, 2022 ; Baghel et al., 2024). Ces fonctionnalités en font un outil précieux pour les chercheurs et praticiens s'intéressant aux dynamiques spatiales. Toutefois, son efficacité reste dépendante de la qualité des données d'entrée, et le modèle peut présenter des limites dans la capture de processus urbains très détaillés ou contextuellement spécifiques.

4.1 Aire d'étude et données

Après avoir présenté les automates cellulaires ainsi que leur évolution, leur hybridation et leur couplage avec d'autres modèles dans le champ des études urbaines, il est maintenant temps de passer à l'application concrète. L'objectif est de vérifier comment ces approches peuvent être utilisées pour comprendre la morphogenèse de la ville islamique traditionnelle, à travers le cas de la Casbah d'Alger. Pour cela, il convient d'abord de préciser l'aire d'étude et les données mobilisées, qui serviront de base au calibrage et à la validation du modèle. En effet La Casbah d'Alger constitue un cas d'étude significatif en raison de son importance historique et de sa morphologie authentique, façonnée par des facteurs socioculturels, politiques et environnementaux. Son développement illustre l'interaction entre les pratiques spatiales locales et les cadres réglementaires plus larges.



Figure 9.7. Evolution de la casbah d'Alger lors des périodes pré-ottomane, ottomane et lors de l'arrivée des andalous, superposée sur un fond de carte issu d'Open Street Map. Source : Auteur.

Cette analyse se concentre sur les périodes antérieures à la colonisation française, qui se manifestent en trois étapes significatives : la phase pré-ottomane (1516), la période ottomane (1580) et l'arrivée des Andalous (1609). Durant ces périodes, la Casbah d'Alger a connu une évolution urbaine marquée par des annexions successives, comme l'illustre la figure 9.7 (Ben Hamouche, 1993, p. 216). La délimitation de chacune de ces étapes s'appuie sur les archives ottomanes ainsi que sur des repères encore existants aujourd'hui, tels que les mosquées de Sidi Ramdane, Ketchaoua, Sidi Mohamed Cherif, Safir, Djedid et Djamaa el Kebir. À partir de 1609, la ville accueille les Andalous fuyant les conséquences de la Reconquista (Missoum, 2014). Selon Cresti (2005), la densité de population à Alger figurait parmi les plus élevées d'Afrique du Nord, estimée à 650 habitants par hectare. L'évolution démographique, présentée dans le tableau 9.2, constitua ainsi un facteur déterminant accompagnant l'évolution urbaine de la ville.

Tableau 9.2. Evolution de la population de la ville historique d'Alger selon les périodes. Source : Cresti, 2005.

Période	Année	Population	Nombre de maisons
Pre-ottomane	1516	20 000	4000
Ottomane	1580	60 000	12200
Arrivé des Andalous	1609	100 000	15000

4.2. Variables affectant la morphogenèse urbaine

Après avoir défini l'aire d'étude, l'étape suivante consiste à préciser les données mobilisées et à identifier les variables qui influencent la morphogenèse de la Casbah d'Alger. En effet, la dynamique urbaine ne peut être comprise qu'à travers l'interaction de plusieurs facteurs : spatiaux, démographiques, socioculturels et environnementaux, qui façonnent la forme et l'évolution de la ville. Ce qui suit présente ces variables et leur rôle dans le processus de transformation urbaine.

4.2.1. Site et conditions naturelles, élévation et pentes

Les données d'élévation de la région d'Alger montrées par la figure 9.8 ont été acquises auprès de l'Institut d'études géologiques des États-Unis (USGS). Il s'agit de données satellitaires SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) qui ont été collectées au cours d'une mission de 11 jours en février 2000 et sont disponibles en libre téléchargement pour environ 80 % du globe (jusqu'à 60° nord et 56° sud). Les élévations ont été mesurées par interférométrie radar, à l'aide d'un capteur radar interférométrique à synthèse d'ouverture (InSAR) en bande X et en bande C (longueur d'onde de 5,6 cm et 5,3 cm, respectivement). Les données SRTM en bande C sont disponibles à 1 seconde d'arc pour les États-Unis et à 3 secondes d'arc en dehors des États-Unis (Athmania et Achour, 2014).

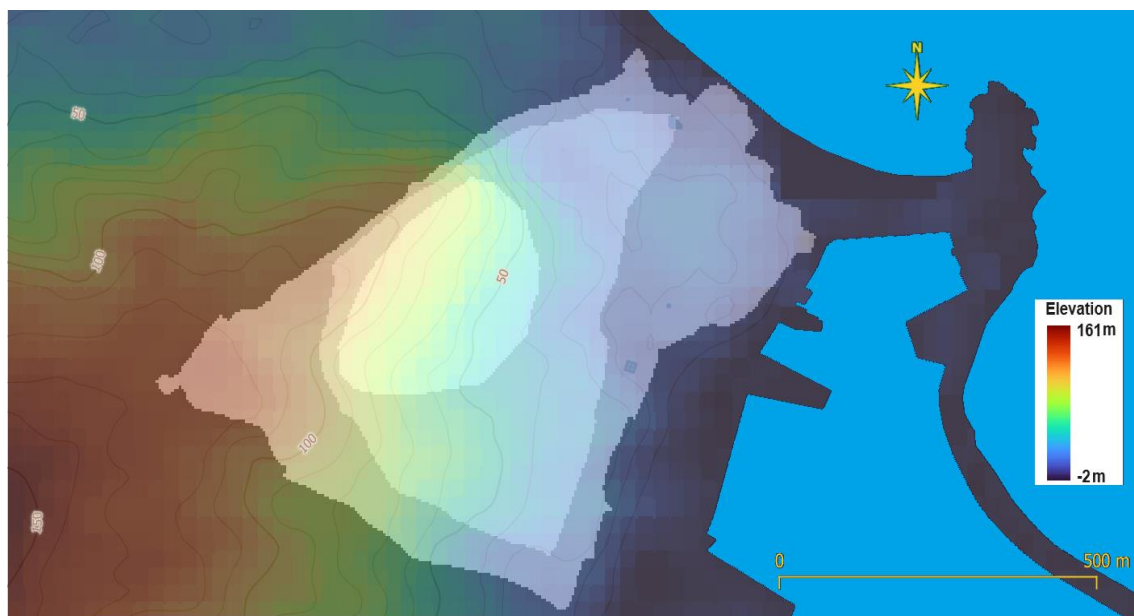


Figure 9.8. Carte d'élévation issue d'une image SRTM, montrant les évolutions de la casbah d'Alger lors des périodes pré-ottomane, ottomane et après l'arrivée des andalous. Source : Auteur.

Les élévations ont constitué un frein de l'extension de la ville, notamment vers le sud-ouest, sauf pour la 2ème et 3ème période qui a connu la construction du complexe palatio-défensif de la citadelle sur un terrain qui connaît une forte déclivité (Chergui et Haddad, 2020). Ainsi, la situation élevée du site de la citadelle dominant la ville, a servi la fonction militaire de ce complexe. La construction des bâtiments et le développement de villes sur des terrains à forte pente ont toujours été problématiques à travers les âges (El Kechebour, 2015). C'est ainsi que l'extension de la ville historique d'Alger vers le nord et le sud-ouest, a été empêchée par le degré important des pentes comme le montre la figure 5. Les pentes ont été calculées à partir des données satellitaires SRTM.

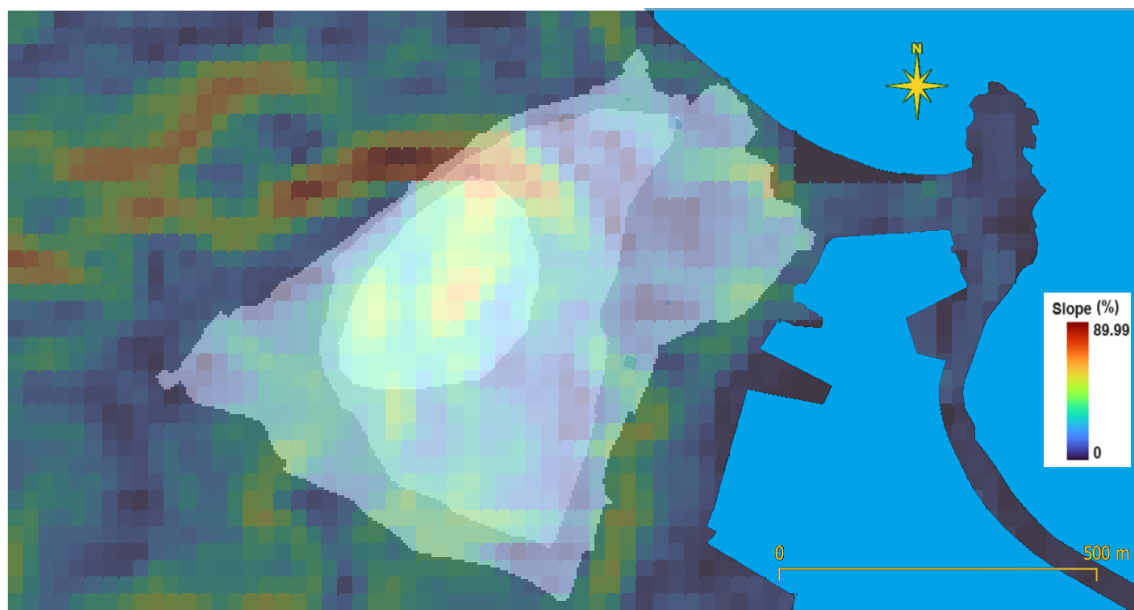


Figure 9.9. Carte des pentes calculées à partir des données satellitaires SRTM, montrant les évolutions de la casbah d'Alger lors des périodes pré-ottomane, ottomane et après l'arrivée des andalous. Source : Auteur.

4.2.2. Réseau viaire

Comme présenté par la figure 9.10, le noyau pré ottoman initial se composait d'un réseau viaire organique. L'extension successive se faisait en anneaux. Les deuxième et troisième étapes de l'évolution après, seront marquées par le déclassement des murailles et la construction des équipements publics sur ordre l'autorité ottomane. La mission de l'autorité se limitait à préparer le cadre urbain général, c'est-à-dire tracer les voies publiques ou les grands axes. Les aménagements à l'intérieur des îlots se faisaient par les habitants. (Ben Hamouche, 1993, p. 215-216). L'organisation de la ville en deux secteurs fonctionnellement différenciés marque une dualité du réseau viaire. La partie basse vouée aux activités économiques, héritée des romains, est caractérisée par un réseau relativement régulier, avec des rues publiques larges. Par contre, la partie haute résidentielle se caractérise par le réseau organique composé des rues étroites et des impasses adaptées aux habitations individuelles (Raymond, 1985 p. 172-173). En effet, la mutation du réseau viaire régulier vers le réseau organique complexe, est un processus partagé dans des villes similaires. Soient héritées des romains ou nouvellement fondées par les musulmans (Petrucchioli, 1999).

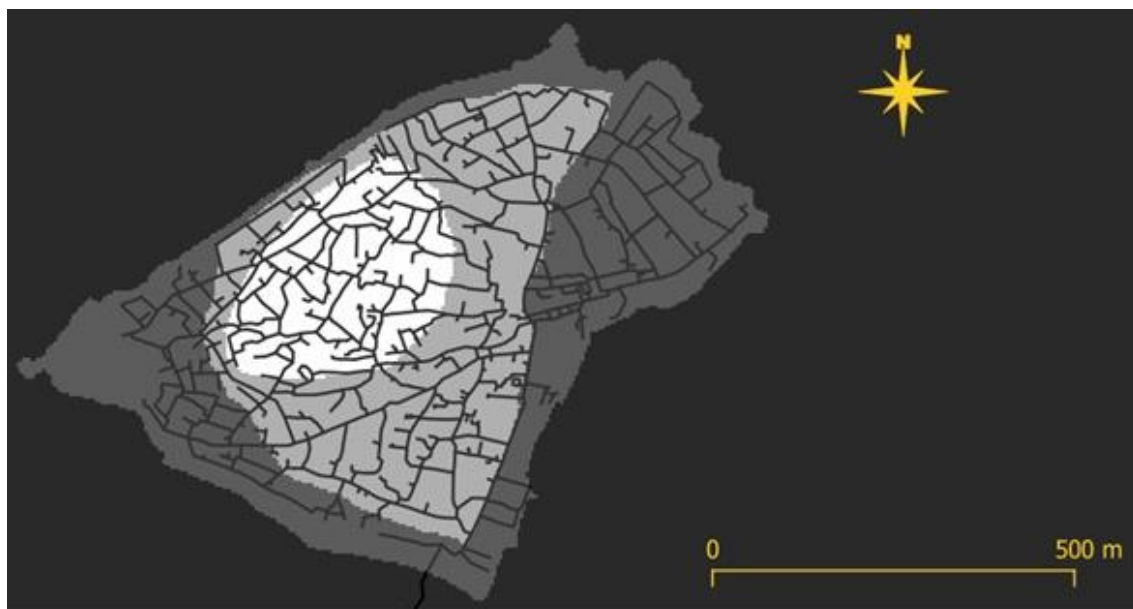


Figure 9.10. Phases d'extension du réseau viaire de la casbah d'Alger. Source : Auteur.

4.3. Méthodologie appliquée

Pour simuler les dynamiques d'occupation du sol à travers une approche fondée sur les automates cellulaires couplée au LULC, il est indispensable de disposer de données d'occupation du sol à deux moments distincts, t et $t + 1$, afin d'analyser les transitions et de calibrer le modèle en conséquence (Muhammad et al., 2022 ; Jain, 2024). Dans cette étude, la calibration est effectuée à partir des données d'occupation du sol de la période 1 (pré-ottomane, 1516) et de la période 2 (ottomane, 1580). La simulation prédictive est ensuite appliquée à la période 3 (arrivée des Andalous, 1609), en utilisant le modèle calibré pour évaluer sa capacité de reconstitution historique.

La méthodologie est opérationnalisée à travers MOLUSCE. Le schéma méthodologique, détaillé dans la figure 9.11, comporte quatre étapes principales :

1. **Acquisition et prétraitement des données**, cette étape comprend la génération de couches explicatives telles que les cartes d'altitude, de pentes et les réseaux de rues historiques numérisés.
2. **Calibration du modèle**, à l'aide de MOLUSCE, la matrice de transition d'occupation du sol est calculée sur la base des données historiques. Le modèle utilise une structure d'automate cellulaire améliorée par l'analyse des changements de surface et la corrélation de Pearson, afin de quantifier l'influence spatiale exercée par chaque variable explicative sur les transitions d'occupation du sol.
3. **Simulation**, deux algorithmes d'apprentissage automatique sont testés dans MOLUSCE, les réseaux de neurones artificiels (ANN) et la régression logistique (LR), afin de simuler les dynamiques d'occupation du sol. Ces modèles génèrent des cartes de probabilité de transformation spatiale, fondées sur les structures spatiales apprises.
4. **Prédiction et sélection du modèle**, les résultats de simulation sont comparés et le modèle le plus précis (dans ce cas, celui présentant la meilleure capacité prédictive pour la période 3) est retenu sur la base de ses indicateurs de performance, notamment le coefficient de Kappa. Cette étape valide l'approche et apporte un éclairage sur les processus historiques ayant façonné la forme urbaine.

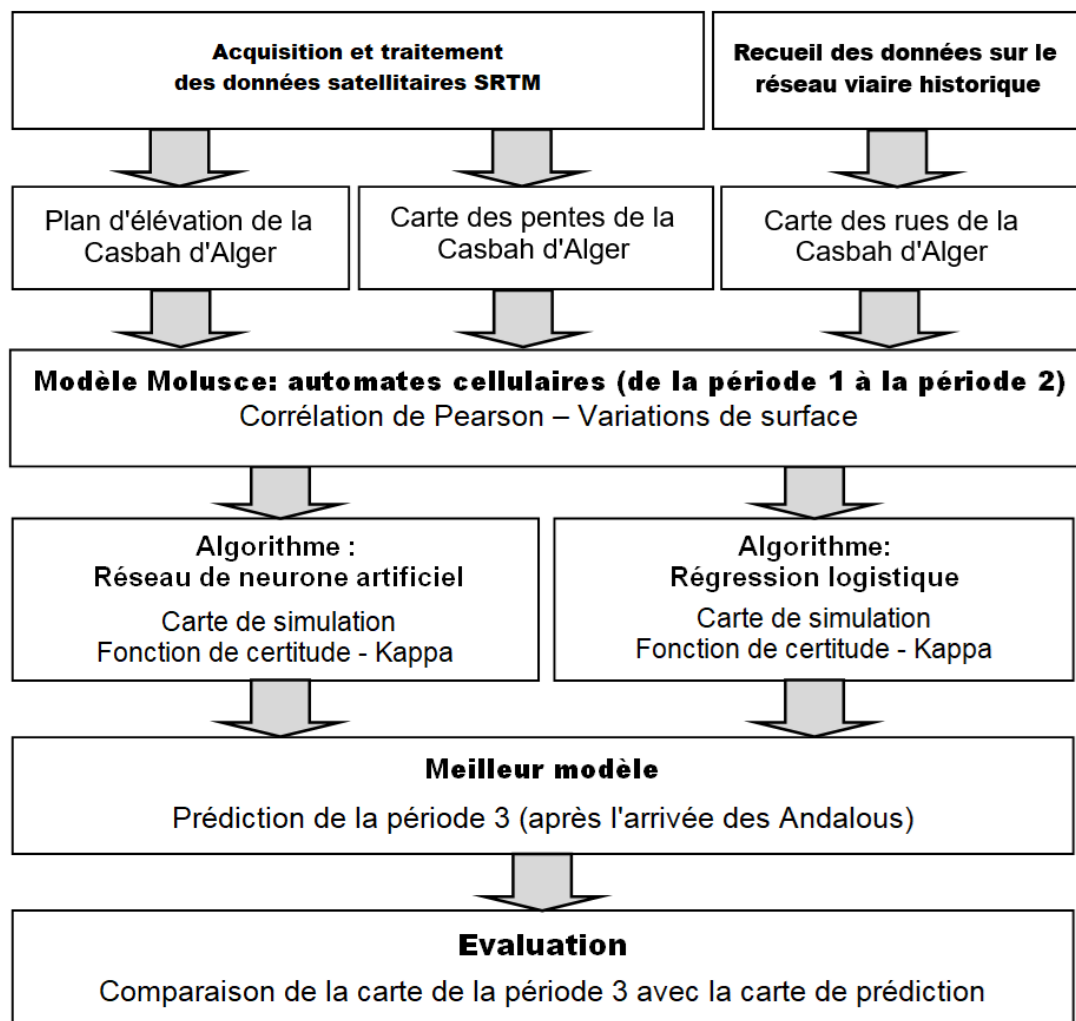


Figure 9.11. Organigramme de la méthodologie développée. Source : Auteur.

5. Discussion et interprétation des résultats

La transformation spatiale de la Casbah d'Alger entre la période 1 (pré-ottomane, 1516) et la période 2 (ottomane, 1580) révèle une reconfiguration significative de la morphologie urbaine de la ville. Au cours de cet intervalle de 64 ans, la superficie bâtie s'est accrue de 113,62 %, atteignant finalement 213,62 % de son étendue initiale. Afin de quantifier cette trajectoire, le taux de changement annuel (Annual Rate of Change, ARC) a été calculé à l'aide de la formule standard établie par Abbas et al. (2021) et Gao et al. (2023) :

$$\text{ARC} = \frac{\text{Surface}_{\text{Final}} - \text{Surface}_{\text{initial}}}{\text{Surface}_{\text{initial}} * t} \times 100 \% \quad (9.2)$$

Où ARC: taux annuel de changement des catégories de couverture terrestre ; SurfaceFinal : Surface de l'année finale ; Surface Initial : Surface de l'année initiale ; t : Intervalle d'années entre l'année finale et l'année initiale.

L'application de cette formule donne un ARC de 3,34 %, ce qui indique un rythme d'urbanisation relativement rapide pour la période considérée. Ce résultat est particulièrement élevé pour un tissu urbain prémoderne, suggérant un processus accéléré de densification par action publique. Des dynamiques urbaines similaires ont été observées dans des villes islamiques traversant des transitions politiques analogues. Cette expansion apparente reflète à la fois une croissance démographique et une restructuration administrative, consécutives à l'intégration d'Alger dans le cadre impérial ottoman. L'ère ottomane introduisit de nouvelles typologies institutionnelles telles que les casernes militaires, les complexes religieux et les bâtiments administratifs, qui redéfinirent la forme urbaine de la ville, comme l'ont également noté des études parallèles sur les villes islamiques sous l'Empire ottoman (Raymond, 1985 ; Ugur, 2018).

Ces dynamiques quantifiées de croissance urbaine ont servi de base empirique à la calibration du modèle MOLUSCE. Comme mentionné précédemment, trois variables : altitude, pente et réseau viaire historique, ont été utilisées comme données d'entrée pour représenter les contraintes spatiales et l'influence du tracé des rues. Leurs interrelations ont été analysées à l'aide des coefficients de corrélation de Pearson, présentés dans le tableau 9.3. Cette analyse statistique permet de mieux comprendre les dépendances spatiales, d'identifier d'éventuels problèmes de multi colinéarité et de renforcer la robustesse de l'approche de modélisation multivariée (Gao et al., 2023 ; Baghel et al., 2024).

Tableau 9.3. Coefficients de corrélation de Pearson entre les variables en entrée. Source : Auteur.

	Elévation	Pente	Réseau viaire
Elévation		0.5045	0.1335
Pente			0.2494
Réseau viaire			

Les résultats montrent une corrélation positive modérée entre l'altitude et la pente ($r = 0,5045$), ce qui est attendu compte tenu de leur relation naturelle. En revanche, le réseau viaire présente de faibles corrélations aussi bien avec l'altitude ($r = 0,1335$) qu'avec la pente ($r = 0,2494$), ce qui suggère une distribution spatiale relativement indépendante. Cette faible interdépendance du réseau de rues est particulièrement visible durant la phase initiale du développement urbain. À cette époque, le noyau originel fut établi sur un terrain relativement homogène sur le plan topographique, et le réseau se développa principalement sous l'influence de facteurs socioculturels et religieux, la topographie jouant un rôle secondaire. Cette observation est en accord avec les dynamiques observées dans d'autres villes islamiques (Mortada, 2003 ; Akbar, 2021). Cette indépendance statistique entre les variables d'entrée renforce la capacité prédictive du modèle MOLUSCE, en minimisant les redondances et en augmentant la diversité des facteurs spatiaux intégrés à la simulation.

Un algorithme de réseau de neurones artificiels (ANN) a été utilisé pour entraîner le modèle sur 1000 itérations, aboutissant à un coefficient de Kappa de 0,77 mais à un score de précision remarquablement faible de 0,08. Cet écart important peut indiquer un problème de calibration lié à la fonction de perte, ou refléter une instabilité du modèle dans certaines zones de l'aire d'étude. La courbe d'apprentissage de ce modèle ANN, présentée dans la figure 9.12, illustre son processus de calibration pour simuler l'évolution du tissu urbain historique d'Alger entre la période 1 et la période 2.

En parallèle, un algorithme de régression logistique (LR) a également été entraîné sur 1000 itérations, produisant un coefficient pseudo- R^2 plus élevé de 0,91. Pour les deux algorithmes, des probabilités de transition ont été générées sous forme de cartes de fonctions de certitude, présentées dans la figure 9.13. Le modèle ANN a montré une certitude particulièrement faible dans la partie nord de l'aire d'étude et le long de l'axe longitudinal adjacent au noyau pré-ottoman, probablement en raison de la complexité morphologique de ces zones ou de la limitation des données d'entrée utilisées. En revanche, l'algorithme de régression logistique a produit des sorties spatiales plus cohérentes, avec des incertitudes principalement limitées à la zone militaire de la citadelle.

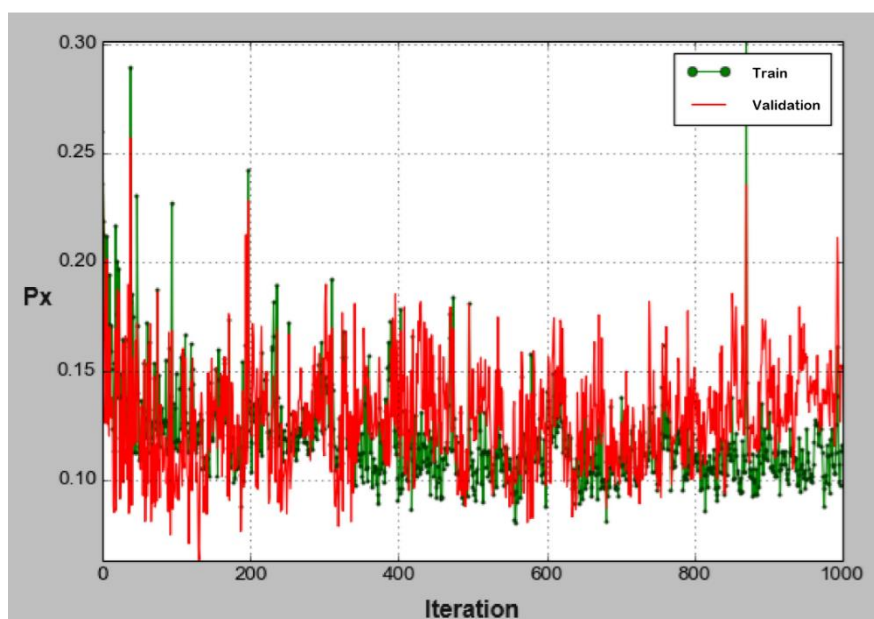


Figure 9.12 Courbe d'apprentissage du réseau de neurones artificiels. Source : Auteur.

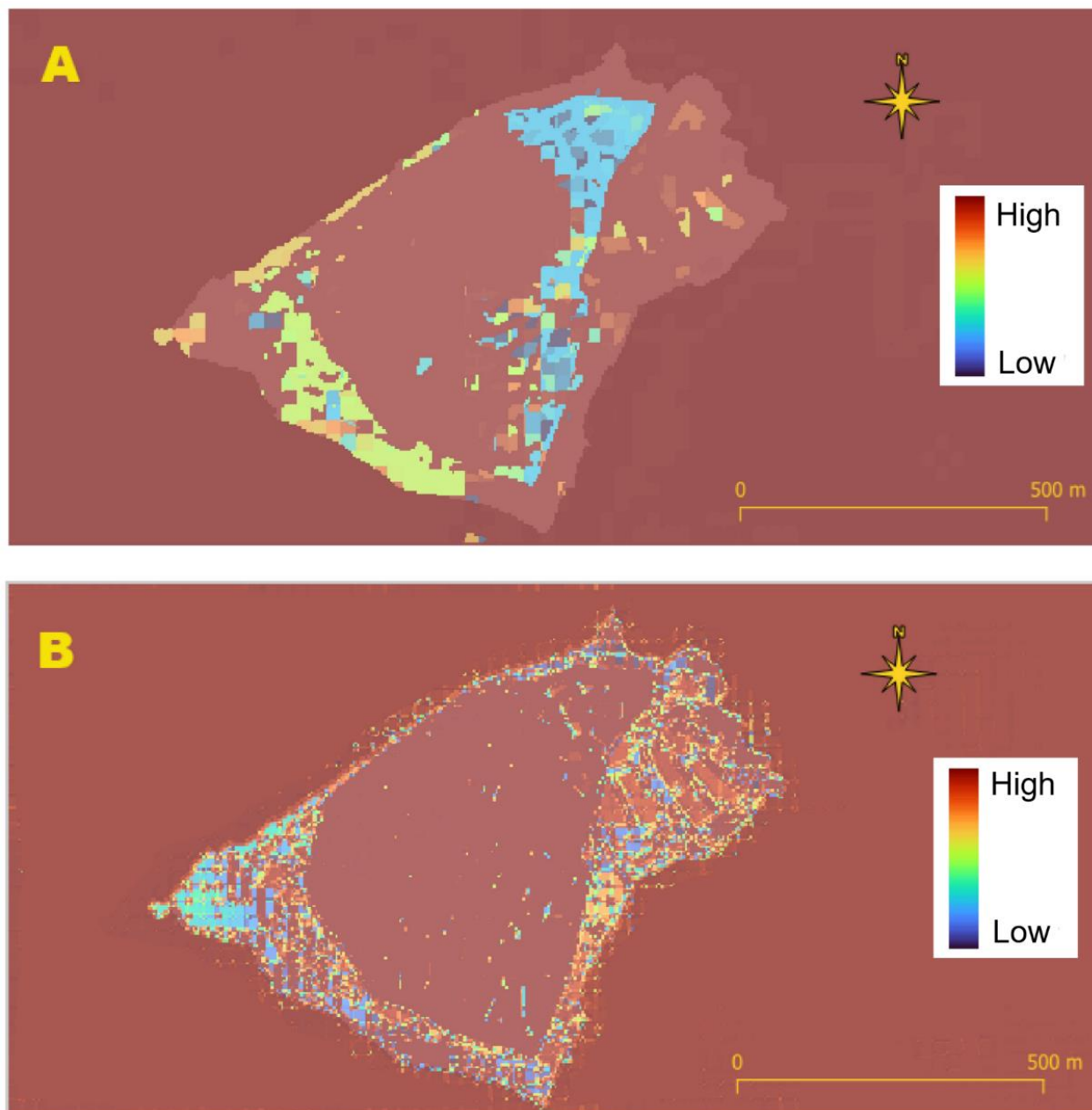


Figure 9.13. Carte de la fonction de certitude de la simulation : (A) basé sur le réseau de neurones artificiels ; (B) basée sur la régression logistique. Source : Auteur.

En comparant les cartes de simulation produites par les deux algorithmes à l'occupation du sol observée durant la période 3, le modèle ANN a obtenu un coefficient de Kappa de 0,69, tandis que le modèle de régression logistique a présenté de meilleures performances, avec un coefficient de 0,82. Sur la base des fonctions de certitude et des indicateurs de Kappa, le modèle fondé sur la régression logistique a été retenu pour simuler l'expansion urbaine jusqu'à l'année 1708. Cette simulation a impliqué deux itérations du modèle, chacune représentant 64 années d'évolution, comme illustré dans la figure 9.14. Les résultats apparaissent relativement cohérents avec les dynamiques d'urbanisation connues à cette époque, en particulier en ce qui concerne l'expansion urbaine et la densification du noyau ottoman, ainsi que sa croissance contrôlée. Toutefois, certaines divergences subsistent, notamment autour du périmètre de la ville et dans les zones militaires, ce qui reflète

probablement soit des morphologies complexes, soit l'insuffisance des variables explicatives dans ces secteurs (figure 9.15).

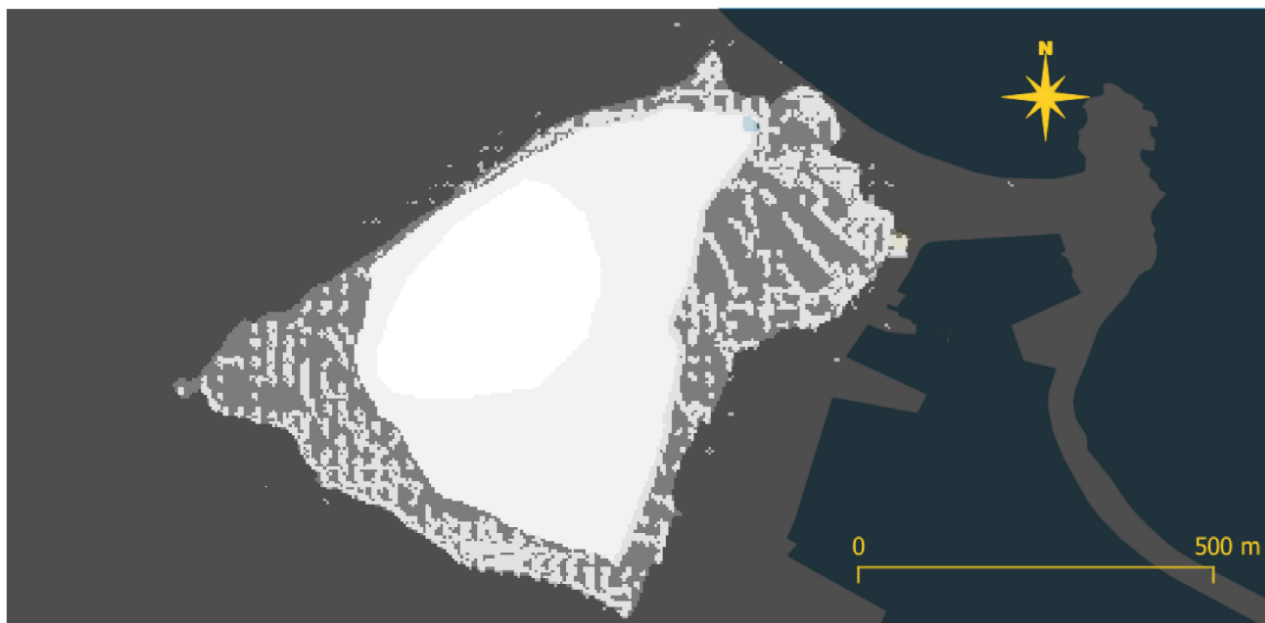


Figure 9.14. Evolution de la ville historique d'Alger en l'an 1708 réalisée à partir du modèle d'automate cellulaire calibré et basé sur un algorithme de régression logistique. Source : Auteur.



Figure 9.15. Localisation des casernes militaires dans la casbah d'Alger. Source : Auteur.

Ces résultats comparatifs offrent des éclairages méthodologiques et épistémologiques précieux sur la modélisation de la morphogenèse urbaine historique. Bien que les réseaux de neurones artificiels (ANN) soient théoriquement adaptés à la capture de dynamiques spatiales complexes (Yeh et Li, 2002 ; Almeida et al., 2008), leur application dans cette étude a révélé des limites en termes de cohérence spatiale et d'interprétabilité. L'ANN a eu du mal à simuler la croissance dans les zones périphériques sous-représentées de la Casbah, conséquence probable de sa sensibilité à la représentativité des données d'entraînement (Zhang et

Goodchild, 2002). La faible précision obtenue met en évidence un défi plus large des simulations historiques : la rareté et la fragmentation des données archivistiques et cartographiques. En revanche, le modèle de régression logistique a produit des résultats plus robustes et plus interprétables. Cela rejoint des recherches indiquant que, dans des contextes marqués par la rareté des données mais une forte complexité historique, des modèles simples peuvent surpasser des approches plus complexes en termes de performance et de fiabilité (Hu et Lo, 2007 ; Lin et al., 2011). La capacité du modèle LR à générer des sorties spatialement cohérentes à partir de sources cadastrales et démographiques fragmentées renforce sa pertinence pour une analyse urbaine orientée vers le patrimoine.

De plus, l'incapacité de l'ANN à saisir les transformations à l'intérieur de la citadelle souligne les limites plus générales des modèles d'automates cellulaires à représenter des structures spatiales institutionnalisées ou symboliques. Les zones militaires ottomanes, façonnées par des impératifs juridiques et stratégiques, obéissaient à des logiques de planification fondamentalement différentes de celles de la croissance urbaine organique. Cela rejoint les critiques adressées aux simulations conventionnelles qui peinent à intégrer les déterminants socio-économiques et juridiques de la forme (Batty, 2007). La meilleure performance de la régression logistique n'implique donc pas un rejet des réseaux de neurones, mais souligne la nécessité d'adapter les approches de modélisation aux caractéristiques des données et au contexte historique.

. Conclusion

Cette application a simulé la morphogenèse de la Casbah d'Alger avant la période coloniale française, en mobilisant les automates cellulaires (CA) comme cadre principal de modélisation, couplés à des méthodes d'apprentissage automatique (réseaux de neurones artificiels – ANN) et à la régression logistique (LR). Cette hybridation méthodologique a permis de tester différentes approches et de comparer leurs performances dans la restitution des dynamiques urbaines. Les résultats montrent que, si les ANN sont plus adaptés au traitement des relations non linéaires, la LR s'est avérée plus robuste, cohérente et interprétable dans un contexte marqué par la rareté et l'hétérogénéité des données historiques. Quant aux CA, ils se sont imposés comme l'outil le plus pertinent pour représenter les processus d'auto-organisation et les interactions locales, confirmant ainsi leur rôle central dans l'analyse des formes urbaines émergentes.

La simulation met en évidence un schéma d'expansion annulaire de la Casbah, structuré par la croissance démographique et les interventions ottomanes, et validé par la concordance entre les résultats numériques et les observations historiques. Ces constats confirment l'hypothèse d'une auto organisation sous-jacente à la morphogenèse des villes islamiques traditionnelles, longtemps décrite de manière qualitative, mais ici formalisée à travers un cadre de modélisation spatiale. Cette démarche de simulation dynamique se révèle ainsi complémentaire aux analyses fondées sur la géométrie fractale et la théorie des réseaux : alors que ces dernières permettent de saisir les propriétés structurelles et invariantes de la morphologie urbaine, la simulation restitue la dimension processuelle et évolutive des formes.

L'articulation de ces approches contribue à une lecture plus complète de la complexité urbaine, croisant structure et dynamique.

Au-delà du cas d'Alger, cette application ouvre des perspectives pour l'utilisation des modèles de simulation dans d'autres médinas telles que Tlemcen, Ghardaïa ou Ouargla. Elle souligne le potentiel des approches quantitatives non seulement pour approfondir la compréhension des logiques morphogénétiques, mais aussi pour contribuer à la conservation patrimoniale, en offrant des outils d'analyse capables de restituer les dynamiques qui ont façonné les tissus historiques. Toutefois, plusieurs limites doivent être reconnues : l'intégration encore partielle des dimensions socio-économiques et institutionnelles, le nombre restreint de variables explicatives, ainsi que la dépendance à la qualité des données géospatiales disponibles. Ces limites ouvrent la voie à de nouvelles recherches, notamment à travers l'enrichissement des bases de données par des informations sémantiques (institutions religieuses, défensives, politiques), le recours à des systèmes multi-agents capables de simuler des dynamiques collectives complexes, et la mise en place de comparaisons pour dégager à la fois des invariants morphogénétiques et des spécificités régionales.

En somme, la démarche adoptée confirme la pertinence des automates cellulaires comme outil de modélisation de la complexité urbaine et démontre le potentiel explicatif de la simulation pour articuler rigueur quantitative et interprétation historique. Cette étape ne se limite pas à clôturer l'analyse historique : elle jette les bases d'une approche intégrée où simulation, théorie et observation empirique se complètent pour éclairer les logiques profondes de la morphogenèse urbaine.

. Notes et références bibliographiques

Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour* [eBook]. Oxford University Press.

Liu, Y. (2009). *Modelling urban development with geographical information systems and cellular automata*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group.

Ilachinski, A. (2001). *Cellular automata: A discrete universe*. Singapore: World Scientific Publishing.

Sayama, H. (2015). *Introduction to the modeling and analysis of complex systems* [e-book]. Open SUNY Textbooks. Milne Library, State University of New York at Geneseo.

White, R., Engelen, G., et Uljee, I. (2015). *Modeling cities and regions as complex systems: From theory to planning applications* [e-book]. The MIT Press.

Tong, X., et Feng, Y. (2020). A review of assessment methods for cellular automata models of land-use change and urban growth. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(5), 866–898.
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658816.2019.1684499>.

Tobler, W. R. (1979). Cellular geography. In S. Gale & G. Olsson (Eds.), *Philosophy in geography* (pp. 379–386). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-9394-5_18.

Couclelis, H. (1985). Cellular worlds: A framework for modeling micro–macro dynamics. *Environment and Planning A*, 17(5), 585–596. <https://doi.org/10.1068/a170585>.

White, R., & Engelen, G. (1993). Cellular automata and fractal urban form: A cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 25(8), 1175–1199. <https://doi.org/10.1068/a251175>.

White, R., Engelen, G., et Uljee, I. (1997). The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(3), 323–343. <https://doi.org/10.1068/b240323>.

Batty, M., & Xie, Y. (1994). From cells to cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21(S1), S31–S48. <https://doi.org/10.1068/b21S031>.

Batty, M., & Xie, Y. (1997). Possible urban automata. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 175–192. <https://doi.org/10.1068/b240175>.

Clarke, K. C., Hoppen, S., et Gaydos, L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 247–261. <https://doi.org/10.1068/b240247>.

Clarke, K. C., & Gaydos, L. J. (1998). Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7), 699–714. <https://doi.org/10.1080/136588198241617>.

White, R., & Engelen, G. (1994). Urban systems dynamics and cellular automata: Fractal structures between order and chaos. *Chaos, Solitons & Fractals*, 4(4), 563–583. [https://doi.org/10.1016/0960-0779\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0960-0779(94)90066-3).

Batty, M. (2005). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.

O’Sullivan, D. B. (2000). *Graph-based cellular automaton models of urban spatial processes* [Thèse de doctorat, University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis].

Moreno Sierra, D. L. (2009). *Une approche réseau pour l'intégration de la morphologie urbaine dans la modélisation spatiale individu-centrée* [Thèse de doctorat en géographie et aménagement, Université de Pau et des Pays de l’Adour].

Wang, H., Liu, X., Zhao, C., Chang, Y., Liu, Y., & Zang, F. (2021). Spatial-temporal pattern analysis of landscape ecological risk assessment based on land use/land cover change in Baishuijiang National Nature Reserve in Gansu Province, China. *Ecological Indicators*, 124, 107454. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107454>.

Garcia-Alvarez, D., Camacho Olmedo, M. T., Mas, J. F., et Paegelow, M. (2022). Land use cover mapping, modelling and validation: A background. In M. T. Camacho Olmedo, J. F. Mas, M. Paegelow, & D. García-Álvarez (Eds.), *Land use cover datasets and validation tools: Validation practices with QGIS* (pp. 21–33). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90998-7>.

Xu, Q., Zhu, A. X., & Liu, J. (2023). Land-use change modeling with cellular automata using land natural evolution unit. *Catena*, 224, 106998. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106998>.

Clarke, K. C. (2008). Mapping and modelling land use change: An application of the SLEUTH model. In *Landscape Analysis and Visualization: Spatial Models for Natural Resource Management and Planning* (pp. 353–366). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69168-6_17.

Chaudhuri, G., & Clarke, K. C. (2013). The SLEUTH land use change model: A review. *Environmental Resources Research*, 1(1), 88–105. <https://doi.org/10.22069/ijerr.2013.1688>.

- Ghalehtemouri, K. J., Shamsoddini, A., Mousavi, M. N., Ros, F. B. C., & Khedmatzadeh, A. (2022). Predicting spatial and decadal land use and land cover change using integrated cellular automata Markov chain model-based scenarios (2019–2049) in Zarriné-Rūd River Basin, Iran. *Environmental Challenges*, 6, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100399>.
- Azabdaftari, A., et Sunar, F. (2024). Predicting urban tomorrow: CA-Markov modeling and district evolution. *Earth Science Informatics*, 17(4), 3215–3232. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01340-4>.
- Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Ou, J., Chen, Y., & Pei, F. (2017). A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 168, 94–116. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.019>.
- Wang, J., Lv, J., Zhang, W., Chen, T., Yang, Y., & Wu, J. (2022). Land-use pattern evaluation using GeoSOS-FLUS in national territory spatial planning: A case study of Changzhi City, Shanxi Province. *Sustainability*, 14(21), 13752. <https://doi.org/10.3390/su142113752>.
- Abbas, Z., Yang, G., Zhong, Y., & Zhao, Y. (2021). Spatiotemporal change analysis and future scenario of LULC using the CA-ANN approach: A case study of the Greater Bay Area, China. *Land*, 10(6), 584. <https://doi.org/10.3390/land10060584>.
- Muhammad, R., Zhang, W., Abbas, Z., Guo, F., et Gwiazdzinski, L. (2022). Spatiotemporal change analysis and prediction of future land use and land cover changes using QGIS MOLUSCE plugin and remote sensing big data: A case study of Linyi, China. *Land*, 11(3), 419. <https://doi.org/10.3390/land11030419>.
- Chettry, V., et Surawar, M. (2021). Delineating urban growth boundary using remote sensing, ANN-MLP and CA model: A case study of Thiruvananthapuram urban agglomeration, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(10), 2437–2450. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01401-x>.
- Alshari, E. A., & Gawali, B. W. (2022). Modeling land use change in Sana'a City of Yemen with MOLUSCE. *Journal of Sensors*, 2022(1), 7419031. <https://doi.org/10.1155/2022/7419031>.
- Baghel, S., Kothari, M. K., Tripathi, M. P., Singh, P. K., Bhakar, S. R., Dave, V., & Jain, S. K. (2024). Spatiotemporal LULC change detection and future prediction for the Mand catchment using MOLUSCE tool. *Environmental Earth Sciences*, 83(2), 66. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11381-5>.
- Ben Hamouche, M. (1993). *Gestion urbaine de Dar Es-Soltane (Grand Alger 1516-1830) : Essai de ressourcement* [Thèse de doctorat, Université Paris 8].
- Athmania, D., & Achour, H. (2014). External validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI-SRTM v4.1 free access digital elevation models (DEMs) in Tunisia and Algeria. *Remote Sensing*, 6(5), 4600–4620. <https://doi.org/10.3390/rs6054600>.
- Chergui, S., et Haddad, D. (2020). Les abords de la citadelle d'Alger au XIX^e siècle. In J. Navarro Palazón & L. J. García-Pulido (Eds.), *FORTMED 2020 – Defensive Architecture of the Mediterranean* (Vol. 11, pp. 577–584). Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/FORTMED2020.2020.11666>.
- El Kechebour, B. (2015). Relation between stability of slope and the urban density: Case study. *Procedia Engineering*, 114, 824–831. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.034>.
- Raymond, A. (1985). *Grandes villes arabes à l'époque ottomane*. Paris : Sindbad. (Collection Bibliothèque arabe).
- Petrucchioli, A. (1999). The Arab city: Neither spontaneous nor created. *Environmental Design: Journal of the Islamic Environmental Design Research Centre*, 1–2, 22–33. Rome, Italy: Dell'Oca Editore. <https://www.archnet.org/publications/3297>.

- Jain, M. (2024). Future land use and land cover simulations with cellular automata-based artificial neural network: A case study over Delhi megacity (India). *Heliyon*, 10(14), e34662. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34662>.
- Gao, C., Cheng, D., Iqbal, J., & Yao, S. (2023). Spatiotemporal change analysis and prediction of the Great Yellow River Region (GYRR) land cover and the relationship analysis with mountain hazards. *Land*, 12(2), 340. <https://doi.org/10.3390/land12020340>.
- Ugur, Y. (2018). Mapping Ottoman cities: Socio-spatial definitions and groupings (1450-1700). *Journal for Early Modern Cultural Studies*, 18(3), 16-65. <https://doi.org/10.1353/jem.2018.0023>.
- Akbar, J. A. (2021). *Crisis in the built environment: The case of the Muslim city* (2nd ed.) [E-book]. Insan Publications.
- Mortada, H. (2003). *Traditional Islamic principles of the built environment* [eBook edition]. Routledge.
- Yeh, A. G. O., & Li, X. (2002). Urban simulation using neural networks and cellular automata for land use planning. In *Advances in Spatial Data Handling: 10th International Symposium on Spatial Data Handling* (pp. 451–464). Berlin : Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56094-1_33.
- Almeida, C. M., Gleriani, J. M., Castejon, E. F., & Soares-Filho, B. S. (2008). Using neural networks and cellular automata for modelling intra-urban land-use dynamics. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(9), 943–963. <https://doi.org/10.1080/13658810701731168>.
- Zhang, J., & Goodchild, M. F. (2002). *Uncertainty in geographical information*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Hu, Z., et Lo, C. P. (2007). Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31(6), 667–688. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2006.11.001>.
- Lin, Y. P., Chu, H. J., Wu, C. F., & Verburg, P. H. (2011). Predictive ability of logistic regression, auto-logistic regression and neural network models in empirical land-use change modeling: A case study. *International Journal of Geographical Information Science*, 25(1), 65–87. <https://doi.org/10.1080/13658811003752332>.

Chapitre 10 : Conclusion générale

. Conclusion générale

Cette recherche s'inscrit dans une volonté de repenser la ville islamique traditionnelle, longtemps réduite par l'orientalisme à un labyrinthe désordonné et, par les approches classiques de la morphologie urbaine, souvent descriptives, statiques et forgées dans des contextes occidentaux, à une simple curiosité historique. En mobilisant le paradigme des théories de la complexité, la thèse propose un changement épistémologique et méthodologique : envisager la ville islamique comme un système complexe, produit d'une morphogenèse continue et adaptative. L'objectif est de montrer que l'irrégularité apparente de ces tissus urbains recouvre en réalité un ordre sous-jacent et des mécanismes d'auto-organisation, révélant la logique profonde qui préside à leur genèse et à leur évolution.

La première partie de la thèse a posé les fondations théoriques de cette approche. En passant de la simple notion de forme à celle de morphogenèse, la recherche s'inscrit dans une perspective dynamique et processuelle. Comme l'a montré l'introduction, la ville doit être comprise comme un système en perpétuelle transformation, produit des interactions humaines et temporelles. Les approches classiques, statiques et réductionnistes, apparaissent insuffisantes pour saisir cette richesse. Le chapitre 2 a démontré que la forme urbaine n'est pas une donnée figée, mais un instantané d'un processus de transformation. L'intégration des théories de la complexité (chapitre 3) cristallise la phase théorique et conceptuelle en définissant la ville comme un système complexe caractérisé par l'auto organisation, l'émergence et l'adaptabilité.

L'analyse s'est ensuite concentrée sur l'objet central de la recherche : la ville islamique traditionnelle. Le chapitre 4 dresse un panorama critique des paradigmes qui ont tenté d'analyser cette ville, depuis les approches orientalistes la réduisant à un labyrinthe désordonné jusqu'aux lectures plus récentes qui la considèrent comme un système rationnel et fonctionnel. Cette mise en perspective a permis de montrer que les discours scientifiques et idéologiques ont souvent influencé la manière de décrire la morphologie de la médina. Au-delà de la critique, ce chapitre a également présenté les principales composantes morphologiques de la ville islamique traditionnelle : le noyau religieux et institutionnel centré sur la mosquée et ses équipements, le souk comme espace économique et social, les quartiers résidentiels organisés en unités de voisinage, et enfin le réseau viaire hiérarchisé, structuré autour de rues principales, ruelles secondaires et impasses. Ces éléments, loin de relever d'une juxtaposition, obéissent à une logique d'organisation incrémentale et adaptative, où chaque niveau joue un rôle fonctionnel précis. Le chapitre 4 a ainsi démontré que la morphologie de la ville islamique est le résultat d'une articulation entre normes juridiques, pratiques communautaires et conditions spatiales, restituant sa cohérence interne et sa richesse structurelle.

Aussi dans cette analyse contextuelle, le chapitre 5 a mis en évidence le rôle central de la rue et du réseau viaire dans la morphogenèse urbaine. Loin d'être de simples voies de circulation, ils constituent la véritable ossature de la ville, assurant à la fois la structuration spatiale, l'articulation fonctionnelle et la cohésion sociale. Le réseau viaire organise les connexions entre les différents éléments morphologiques : mosquées, souks, quartiers

résidentiels, tout en hiérarchisant les espaces selon leur accessibilité et leur degré d'intégration. À travers la rue, s'expriment non seulement des logiques de déplacement et d'échange, mais aussi des dynamiques sociales, des pratiques quotidiennes et une mémoire collective inscrite dans l'espace. En choisissant le réseau viaire comme base méthodologique, la thèse a opéré le passage de la réflexion théorique à l'analyse empirique, en faisant de cet élément un prisme d'interprétation qui articule structure spatiale, interactions sociales et héritage historique.

L'application empirique s'est déroulée en plusieurs étapes. Le chapitre 6 a montré que la géométrie fractale, par sa capacité à décrire des formes irrégulières et autosimilaires, constitue un modèle opératoire pertinent pour l'étude morphologique. Le chapitre 7 a ensuite mobilisé la théorie des réseaux pour approfondir l'analyse des logiques internes, révélant, à travers les indicateurs de centralité et de connectivité, que le réseau viaire fonctionne comme un système hiérarchisé et structuré, et non comme une simple juxtaposition aléatoire de rues. Le passage du réseau à sa représentation en graphe a permis de dépasser l'approche purement géométrique pour intégrer une dimension systémique. Enfin, le chapitre 8 a validé ces analyses en combinant fractales et réseaux sur quatre cas d'étude : la Casbah d'Alger, la médina de Tlemcen, le ksar de Ghardaïa et le ksar d'Ouargla. Les résultats ont confirmé que leurs réseaux viaires obéissent à des lois d'invariance d'échelle et que l'irrégularité visible traduit une logique interne, où des règles locales de voisinage et d'usage produisent, par itérations successives, des structures globales cohérentes. Sur le plan méthodologique, l'étude a proposé une démarche mixte à dominante quantitative, articulant analyse fractale, théorie des graphes et outils numériques (SIG, Pajek, tests statistiques sur la loi de puissance), ce qui a permis de formaliser la structure des réseaux viaires et de vérifier la présence de signatures fractales dans les tissus étudiés.

À ces analyses s'ajoute le chapitre 9, qui introduit la simulation morphogénétique par automates cellulaires. En mobilisant un cadre expérimental issu des sciences de la complexité, cette approche dépasse la simple mise en évidence de régularités spatiales et restitue la dimension dynamique et processuelle de la morphogenèse urbaine. Appliquée à la Casbah d'Alger, la simulation a confirmé que les interactions locales, fondées sur des règles simples, engendrent des structures globales cohérentes et hiérarchisées, validant ainsi l'hypothèse d'une auto organisation sous-jacente. En complément des approches fractales et des réseaux, elle offre un outil de modélisation capable de reproduire les trajectoires historiques de croissance et de densification, tout en ouvrant la voie à des scénarios prospectifs. Cette hybridation méthodologique (fractales, réseaux, automates cellulaires) enrichit la compréhension de la morphogenèse des villes islamiques traditionnelles en croisant structure et dynamique, observation et simulation.

Les contributions de la présente recherche s'articulent autour de plusieurs registres. Sur le plan théorique, elle enrichit la compréhension de la morphogenèse urbaine en intégrant la ville islamique dans le paradigme de la complexité, en reliant règles normatives endogènes (Fiqh, coutumes) et régularités formelles. Sur le plan méthodologique, elle propose une combinaison d'outils issus de la géométrie fractale, de la théorie des réseaux, et des automates cellulaires. Sur le plan empirique, il documente de manière comparative quatre villes

algériennes, révélant des invariants et des spécificités locales. Enfin, sur le plan patrimonial, il fournit des bases scientifiques pour orienter les stratégies de sauvegarde et de réhabilitation, en respectant la logique interne des tissus traditionnels.

Il convient néanmoins de reconnaître les limites de cette recherche. L'échantillon reste limité à quatre villes et ne reflète pas la diversité de l'ensemble des villes islamiques. Les données cartographiques disponibles, variables en précision et en fiabilité, imposent une lecture prudente des résultats. Par ailleurs, le centrage sur le réseau viaire, bien que fécond, ne permet pas de saisir l'ensemble des dimensions sociales, symboliques et bâties de la morphogenèse. Sur le plan méthodologique, l'analyse s'est appuyée principalement sur une représentation classique du réseau viaire sous forme de graphe primal, mobilisant un nombre restreint d'indicateurs de centralité. Or, l'usage d'autres types de graphes tel que le dual et ses variants, permettrait d'intégrer des variables supplémentaires. De même, le recours à d'autres indicateurs (centralité de proximité, centralité d'intermédiarité, clustering coefficient, modularité, assortativité) offrirait une lecture plus fine des hiérarchies, des communautés et des relations de dépendance entre sous-réseaux. Ces pistes invitent à dépasser une approche uniquement morphologique pour aller vers une compréhension plus systémique et multi-échelles des réseaux urbains. Ces limites ouvrent ainsi la voie à des recherches futures : élargir l'analyse à d'autres contextes (Maghreb, Machrek, Andalousie), explorer d'autres composantes morphologiques (bâti, espaces publics, pleins et vides), et mobiliser d'autres outils de la complexité (dimension fractale, multifractalité, dynamiques non-linéaires, entropie, simulation multi-agents...).

À ces contraintes générales s'ajoutent celles propres à la simulation par automates cellulaires. Malgré leur intérêt méthodologique, elles présentent plusieurs restrictions. Sur le plan conceptuel, ils reposent sur des règles locales simples appliquées uniformément, ce qui tend à réduire la diversité réelle des comportements sociaux et urbains. Méthodologiquement, leur performance est fortement tributaire de la qualité et de la disponibilité des données historiques et spatiales, souvent fragmentaires ou imprécises dans le cas des villes historiques, et du choix restreint des variables explicatives mobilisées (pente, altitude, réseau viaire). En outre, la comparaison des algorithmes a montré que si les réseaux de neurones artificiels peinent à produire des résultats cohérents dans ce contexte, la régression logistique, plus robuste, simplifie néanmoins les dynamiques. Enfin, les automates cellulaires intègrent difficilement les logiques institutionnelles, politiques ou symboliques, comme la création d'équipements religieux ou militaires, qui échappent aux processus d'auto organisation et de voisinage. Ces limites rappellent que la simulation doit être considérée comme un outil complémentaire, à articuler avec d'autres approches capables de saisir la complexité socio-économique et culturelle de la morphogenèse urbaine.

En définitive, cette thèse constitue un essai de repenser les études urbaines et patrimoniales, en proposant une lecture renouvelée de la ville islamique traditionnelle. Elle démontre que la forme urbaine peut être lue comme un langage dont les théories de la complexité nous donnent la grammaire. En déplaçant la discussion du désordre apparent vers l'ordre caché, elle a non seulement déconstruit les mythes orientalistes, mais aussi scientifiquement réhabilité le caractère rationnel, adaptatif et auto organisé des villes

islamiques traditionnelles. Elle ouvre ainsi la voie à une compréhension renouvelée de ces villes comme des systèmes complexes, où la forme est le reflet d'un processus continu d'adaptation et d'émergence, conciliant science et culture, passé et avenir. L'apport principal de ce travail a été de replacer la ville islamique traditionnelle, notamment en Algérie, dans une perspective scientifique qui reconnaît sa cohérence interne et son organisation propre. Loin des stéréotypes, la recherche a montré qu'elle est le produit de mécanismes régulateurs précis : règles juridiques issues du fiqh, solidarités communautaires, hiérarchisation des espaces et adaptation aux contraintes locales. Cette relecture peut contribuer à restituer à ces villes leur authenticité et leur rationalité, en les inscrivant dans la continuité des dynamiques sociales et culturelles qui les ont façonnées.

Bibliographie générale

. Bibliographie générale

. Chapitre 1

- Weber, M. (1995). *Économie et société* (Tome 1, Trad. J. Freund, J. Chavy & É. de Dampierre). Paris : Pocket. (Œuvre originale publiée en 1921).
- George, P., et Verger, F. (2004). *Dictionnaire de la géographie* (8e éd.). Paris : Presses universitaires de France.
- Pumain, D. (2006a). Villes et systèmes de villes dans l'économie. *Revue d'économie financière*, 86(5), 29–46. <https://doi.org/10.3406/ecofi.2006.4196>.
- Lévy, J., et Lussault, M. (dir.). (2013). *Dictionnaire de géographie et de l'espace des sociétés*. Paris : Belin.
- Kostof, S. (1991). *The city shaped: Urban patterns and meanings through history*. London : Thames & Hudson.
- Mumford, L. (1961). *The city in history: Its origins, its transformations, and its prospects*. New York, NY: Harcourt, Brace & World.
- Ibn Khaldoun. (1978). *Discours sur l'histoire universelle (Al-Muqaddima)*. Traduction, préface et notes par Vincent Monteil. Paris : Sindbad.
- Secchi, B. (2011). *Première leçon d'urbanisme* (P. Ingallina, Trad.). Marseille : Édition Parenthèses [Collection Eupalinos].
- Douady, C.-N. (2014). *De la trace à la trame : La voie, lecture du développement urbain*. Paris : L'Harmattan.
- West, G. (2017). *Scale: The universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies* [Ebook edition]. Penguin Press.
- Bourdin, S., Paoli, M., et Reltgen-Tallon, A. (2015). *La forme de la ville de l'Antiquité à la Renaissance* [Édition numérique]. Presses universitaires de Rennes.
- Conzen, M. R. G. (1960). *Alnwick, Northumberland: A study in town-plan analysis* (Institute of British Geographers Publication 27). London : George Philip.
- Muratori, S. (1959). *Studi per una operante storia urbana di Venezia I*. Rome : Istituto Poligrafico dello Stato, Libreria dello Stato.
- Caniggia, G., et Maffei, G. L. (2001). *Architectural composition and building typology: Interpreting basic building*. Florence : Alinea Editrice.
- Panerai, P., Castex, J., & Depaule, J.-C. (1997). *Formes urbaines, de l'îlot à la barre*. Paris, France: Éditions Parenthèses [Collection Eupalinos / A+U].
- Lynch, K. (1969). *L'image de la cité*. Paris : Dunod.
- Rossi, A. (2006). *L'architecture de la ville*. Gollion : Infolio. [Collection Archigraphy].
- Nasser, N. (2002). Islamic urbanism: The state of the art. *Built Environment*, 28(3), 172–186. Alexandrine Press. <http://www.jstor.org/stable/23288450>.
- Merlin, P., et Choay, F. (Éds.). (1996). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement* (2e éd.). Paris : Presses Universitaires de France - PUF.
- Raymond, A. (1994). Islamic city, Arab city: Orientalist myths and recent views. *British Journal of Middle Eastern Studies*, 21(1), 3–18. <https://www.jstor.org/stable/195564>.

- Oliveira, V. (2016). *Urban Morphology: An Introduction to the Study of the Physical Form of Cities*. Cham: Springer.
- Lévy, A. (2015). La forme urbaine comme forme complexe : Une introduction à la morphologie urbaine. Dans S. Franceschelli, M. Gribaudi & H. Le Bras (Dirs.), *Morphogenèse et dynamiques urbaines : Les ateliers de morphologie EHESS-EnsAD* (pp. 20–35). Lyon : PUCA.
- Franceschelli, S., Gribaudi, M., & Le Bras, H. (2015). Introduction. Dans S. Franceschelli, M. Gribaudi & H. Le Bras (Dirs.), *Morphogenèse et dynamiques urbaines : Les ateliers de morphologie EHESS-EnsAD* (pp. 11–17). Lyon : PUCA.
- Gauthier, B. (2003). *Espace urbain, vocabulaire et morphologie*. Paris : Éditions du Patrimoine.
- Plazanet, C., et Berger, P. (2008). *Morphogenèse de la métropole : Rapport final* [Projet de recherche interdisciplinaire EPFL / VPAA / Fonds 590612]. Lausanne, Suisse : EPFL, laboratoire UTA.
- Lesne, A., & Bourguine, P. (2006). Introduction. In P. Bourguine & A. Lesne (Eds.), *Morphogenèse : L'origine des formes* (pp. 13–26). Paris : Éditions Belin.
- Tort, P. (1996). *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*. Paris : Presses Universitaires de France -PUF.
- Roudavski, S. (2009). Towards morphogenesis in architecture. *International Journal of Architectural Computing*, 7(3), 345–374. <https://doi.org/10.1260/147807709789621266>.
- Sharpe, C. A. (1986). The teaching of urban morphogenesis. *Canadian Geographer*, 30(1), 53–59. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.1986.tb01025.x>.
- Batty, M. (2013). *The new science of cities* [eBook edition]. Cambridge, MA: MIT Press.
- Portugali, J. (2000). *Self-Organization and the City* [eBook edition]. Berlin: Springer-Verlag.
- Holland, J. H. (2014). *Complexity: A very short introduction* [E-book edition]. Oxford University Press.
- Jiang, B. (2015). A city is a complex network. In M. W. Mehaffy (Ed.), *Christopher Alexander: A city is not a tree: 50th anniversary edition* (pp. 89–100). Portland, OR: Sustasis Press.
- Balmaceda, B., et Fuentes, M. A. (2016). Cities and methods from complexity science. *Journal of Systems Science and Complexity*, 29(5), 1177–1186. <https://doi.org/10.1007/s11424-016-6084-2>.
- Portugali, J. (2012). Complexity theories of cities: Achievements, criticism and potentials. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), *Complexity theories of cities have come of age* (pp. 47–62). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_4.
- Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude : Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste* [Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d'Azur, Nice].
- Batty, M. (2005). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Dauphiné, A. (2011). *Géographie fractale : Fractals auto-similaire et auto-affine*. Paris : Hermès-Lavoisier.
- Basili, L. L. (1998). The fractal geometry of urban organisation: Beyond the crisis of 'spontaneous order'. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 267–295). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_8.
- Mandelbrot, B. (1982). *The fractal geometry of nature*. San Francisco: W. H. Freeman.

- Pumain, D. (1998). Urban research and complexity. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 323–337). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_10.
- Allen, P. M. (2005). *Cities and regions as self-organizing systems: Models of complexity* (eBook ed.). Taylor & Francis e-Library.
- Batty, M., et Longley, P. (1994). *Fractal cities: A geometry of form and function* [eBook edition]. Academic Press.
- Hamaina, R., Leduc, T., & Moreau, G. (2012). Caractérisation des tissus urbains à partir de l'analyse structurelle des réseaux viaires. *Cybergeo*, (581). <https://doi.org/10.4000/cybergeo.25009>.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour* [eBook]. Oxford University Press.
- Liu, Y. (2009). *Modelling urban development with geographical information systems and cellular automata*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Marshall, S., Gil, J., Kropf, K., Tomko, M., & Figueiredo, L. (2018). Street network studies: From networks to models and their representations. *Networks and Spatial Economics*, 18(3), 735–749. <https://doi.org/10.1007/s11067-018-9427-9>.
- Akbar, J. A. (2021). *Crisis in the built environment: The case of the Muslim city* (2nd ed.) [E-book]. Insan Publications.
- Petrucchioli, A. (2007). *After amnesia: Learning from the Islamic Mediterranean urban fabric*. Bari : ICAR.
- Neglia, G. A. (2008). Some historiographical notes on the Islamic city with particular reference to the visual representation of the built city. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The City in the Islamic World* (Vol. 1, pp. 1–46). Leiden: Brill. <https://doi.org/10.1163/ej.9789004162402.i-1500.6>.
- Abu-Lughod, J. L. (1987). The Islamic city: Historic myth, Islamic essence, and contemporary relevance. *International Journal of Middle East Studies*, 19(2), 155–176. <https://doi.org/10.1017/S0020743800031822>.
- Raymond, A. (2008). The spatial organization of the city. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The City in the Islamic World* (Vol. 1, pp. 47–70). Leiden: Brill. <https://doi.org/10.1163/ej.9789004162402.i-1500.15>.
- Devoulx, A. (1870). *El Djazaïr: histoire d'une cité d'Icosium à Alger* (B. Belkadi & M. Benhamouche, Eds.). Alger: ENAG.
- Cottureau, J. (1930). La maison mauresque. *Chantiers nord-africains*, 2(6), 531–609. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k97419498>.
- Marçais, G. (1957). *Mélanges d'histoire et d'archéologie de l'Occident musulman*. Alger: Direction des Beaux-Arts.
- Akbar, J. A. (1994). Is there an Islamic city? *Journal of Architecture and Planning*, 6, 3–28. https://cap.ksu.edu.sa/ar/JAP_vol6.
- Allain, R. (2004). Morphologie urbaine : Géographie, aménagement et architecture de la ville (Coll. U Géographie). Paris : Armand Colin.
- Al-Lahham, A. (2004). Orientalism in the readings of Muslim built environments. *Journal of Architecture and Planning*, 16, 95–174. https://cap.ksu.edu.sa/ar/JAP_vol16.
- Al-Hathloul, S. (1981). *Tradition, continuity and change in the physical environment: The Arab-Muslim city*. [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].

- Akbar, J. A. (1984). *Responsibility and the traditional Muslim built environment* [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].
- Hakim, B. S. (1986). *Arabic Islamic cities: Building and planning principles*. London: Routledge.
- Ben Hamouche, M. (2009). Can chaos theory explain complexity in urban fabric? Applications in traditional Muslim settlements. In K. Williams (Ed.), *Nexus network journal* (Vol. 11, No. 2). Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8976-5_6.
- Ben Hamouche, M. (2011). Fractal geometry in Muslim cities: How succession law shaped morphology. *Nexus Network Journal*, 13(2), 235–251. <https://doi.org/10.1007/s00004-011-0062-8>.
- Dauphiné, A. (2003). *Les théories de la complexité chez les géographes*. Paris : Anthropos (Économica).
- Sokal, A. D., et Bricmont, J. (1999). *Fashionable nonsense: Postmodern intellectuals' abuse of science* [Ebook edition]. Picador.
- Fankhauser, P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Paris : Anthropos (collection « Villes »).
- Boeing, G. (2018a). Measuring the complexity of urban form and design. *Urban Design International*, 23(4), 281–292. <https://doi.org/10.1057/s41289-018-0072-1>.
- Dauphiné, A. (2011). *Géographie fractale : Fractals auto-similaire et auto-affine*. Paris : Hermès-Lavoisier.
- Salinger, N. A., Coward, L. A., West, B. J., et van Bilsen, A. (2005). *Principles of urban structure*. Amsterdam: Techne Press.
- Mrvar, A., & Batagelj, V. (2016). Analysis and visualization of large networks with program package Pajek. *Complex Adaptive Systems Modeling*, 4(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s40294-016-0017-8>.
- Clauset, A., Shalizi, C. R., & Newman, M. E. J. (2009). Power-law distributions in empirical data. *SIAM Review*, 51(4), 661–703. <https://doi.org/10.1137/070710111>.
- Virkar, Y., & Clauset, A. (2014). Power-law distributions in binned empirical data. *Annals of Applied Statistics*, 8(1), 89–119. <https://doi.org/10.1214/13-AOAS710>.
- Groat, L., & Wang, D. (2013). *Architectural research methods* (2nd ed. [eBook edition]). Wiley.

. Chapitre 2

- Bourdin, S., Paoli, M., et Reltgen-Tallon, A. (2015). *La forme de la ville de l'Antiquité à la Renaissance* [Édition numérique]. Presses universitaires de Rennes.
- West, G. (2017). *Scale: The universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies* [Ebook edition]. Penguin Press.
- Dauphiné, A. (2003). *Les théories de la complexité chez les géographes*. Paris : Anthropos (Économica).
- Roudavski, S. (2009). Towards morphogenesis in architecture. *International Journal of Architectural Computing*, 7(3), 345–374. <https://doi.org/10.1260/147807709789621266>.
- Plazanet, C., et Berger, P. (2008). *Morphogenèse de la métropole : Rapport final* [Projet de recherche interdisciplinaire EPFL / VPAA / Fonds 590612]. Lausanne, Suisse : EPFL, laboratoire UTA.
- Rey, A. (Éd.). (2009). *Le Petit Robert de la langue française 2009* (édition revue et corrigée). Paris : Dictionnaires Le Robert.

- Jeuge-Maynard, I. (Éd.). (2010). *Le Petit Larousse illustré 2010*. Paris : Larousse.
- Tort, P. (1996). *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*. Paris : Presses Universitaires de France -PUF.
- Dubois, J., Mitterand, H., & Dauzat, A. (2005). *Grand dictionnaire étymologique et historique du français*. Paris : Larousse.
- Davies, J. A. (2005). *Mechanisms of morphogenesis* [eBook edition]. Elsevier Academic Press.
- Tirico, M. (2020). *Morphogenesis of complex networks: An application in urban growth* [Thèse de doctorat, Université Le Havre Normandie]. Le Havre: Université Le Havre Normandie.
- Lesne, A., & Bourguine, P. (2006). Introduction. In P. Bourguine & A. Lesne (Eds.), *Morphogenèse : L'origine des formes* (pp. 13–26). Paris : Éditions Belin.
- Cambien, A. (2007). *Une introduction à l'approche systémique : Appréhender la complexité* (Rapport de recherche). Lyon: Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU).
- Silva, V. (2010). *Conception et évaluation d'un prototype de simulation de la morphogenèse urbaine par agents vecteurs multi-échelles* [Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Laboratoire de systèmes d'information géographique, Programme doctoral en environnement]. École polytechnique fédérale de Lausanne.
- Fortier, J.-F. (2023). *Géomorphogenèse : définition et explications*. AquaPortail. <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/13415/geomorphogenese>.
- Pernreiter, S., Gonzalez-Alvarez, I., Klump, J., Smith, G., & Ibrahimi, T. (2018). *Landscape evolution in the south Yilgarn Craton and Albany-Fraser Orogen, Western Australia* (CSIRO: EP183453). CSIRO. <https://doi.org/10.4225/08/5b22bb3b9f4af>.
- Aubin, J.-P., & Lesne, A. (2006). Analyse morphologique et mutationnelle : des outils pour la morphogenèse. In P. Bourguine & A. Lesne (Eds.), *Morphogenèse : L'origine des formes* (pp. 309–326). Paris : Éditions Belin.
- Pousse, R. (2020). *Caractérisation et modélisation du réseau viaire* [Thèse de doctorat, Université de Paris]. Laboratoire Matière et Systèmes Complexes.
- Pretorius, D. (2020). *A Morphogenetic Approach to Social Development* [Rapport de recherche]. Göteborg : Mistra Urban Futures.
- Maccarini, A. M. (2011). Towards a new European sociology: The morphogenetic approach between social analysis and grand theory. In A. M. Maccarini, E. Morandi, & R. Prandini (Eds.), *Sociological realism* (1st ed., pp. 27–52). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203803356>.
- Archer, M. S. (2013). Social morphogenesis and the prospects of morphogenic society. In M. S. Archer (Ed.), *Social morphogenesis* (pp. 1–22). New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6128-5>.
- Gonod, M. (2014). *Le vivant, l'organisme et la morphologie : Repenser la forme au début du XIX^e siècle. L'exemple de Goethe* [Article en ligne]. Épistémocritique, (13). <https://epistemocritique.org/le-vivant-lorganisme-et-la-morphologie-repenser-la-forme-au-debut-du-xixe-siecle-lexemple-de-goethe/>.
- Schmitt, S. (2001). Type et métamorphose dans la morphologie de Goethe, entre classicisme et romantisme / Type and metamorphosis in Goethe's morphology: Between classicism and romanticism. *Revue d'histoire des sciences*, 54(4), 495–521. <https://doi.org/10.3406/rhs.2001.2135>.

- Park, J.-J. (2010). *Morphogenèse de la ville contemporaine : Essai sur la multi-échelle* [Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Laboratoire de projet urbain, territorial et architectural, Programme doctoral en environnement]. École polytechnique fédérale de Lausanne.
- Thompson, D. W. (1917). *On growth and form*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Scheffer, O. (2017). *Villes émergentes, villes mutantes : La théorie des systèmes complexes et de l'évolution appliquée à la modélisation urbaine* [eBook edition]. London: Éditions universitaires européennes.
- Franceschelli, S. (2012). Morphogenèse et paysages dynamiques. In S. Franceschelli et al., *Morphogenèse et dynamiques urbaines*. Cycle de séminaires organisé par le PUCA (pp. 218–230). Lyon, France: PUCA.
- Cazzaro, I. (2020). L'émergence d'une forme : Le modèle d'Alan Turing et la conception de l'image entre *Naturalia et Artificialia*. In *L'Imagination. Actes du 37e Congrès de l'ASPLF*. London : College Publications.
- Turing, A. M. (1952). The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 237(641), 37–72. <https://doi.org/10.1098/rstb.1952.0012>
- Le Guyader, H. (2008). Morphogenèse, structures physiques et évolution biologique. *Comptes Rendus Chimie*, 11(3), 186–191. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2007.11.001>.
- Petitot, J. (2006). Les modèles morphogénétiques de René Thom. In P. Bourguin & A. Lesne (Eds.), *Morphogenèse : L'origine des formes* (pp. 288–297). Paris: Éditions Belin.
- Marcos, I., & Morier, C. (2023). Centenaire de René Thom (1923–2023) : hommage sémiotique et morpho dynamique. *Estudos Semióticos*, 19(1), i–xxviii. <https://doi.org/10.11606/issn.1980-4016.esse.2023.210388>
- Waddington, C. H. (1989). Avant-propos. In R. Thom, *Structural stability and morphogenesis: An outline of a general theory of models* (pp. xxvi–xxvii) [eBook edition]. Taylor & Francis Group.
- Alexander, C. (1964). *Notes on the synthesis of form*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Mehaffy, M. (2007). Notes on the genesis of wholes: Christopher Alexander and his continuing influence. *Urban Design International*, 12(1), 41–49. <https://doi.org/10.1057/palgrave.udi.9000182>.
- Jiang, B. (2019). Christopher Alexander and his life's work: The *Nature of Order*. *Urban Science*, 3(1), 30. <https://doi.org/10.3390/urbansci3010030>.
- Gauthier, B. (2003). *Espace urbain, vocabulaire et morphologie*. Paris : Éditions du Patrimoine.
- Allain, R. (2004). *Morphologie urbaine : Géographie, aménagement et architecture de la ville*. Paris : Armand Colin.
- Raynaud, D. (1999). Forme urbaine : Une notion exemplaire du point de vue de l'épistémologie des sciences sociales. In P. Boudon (Éd.), *Langages singuliers et partagés de l'urbain* (Actes du colloque LOUEST, CNRS UMR 7544, pp. 93–120). Paris : L'Harmattan.
- Lévy, A. (2005). Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine. *Espaces et Sociétés*, 122(3), 25–48.
- Merlin, P., et Choay, F. (Éds.). (1996). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement* (2^e éd.). Paris : Presses Universitaires de France - PUF.
- Moudon, A. V. (1997). Urban morphology as an emerging interdisciplinary field. *Urban Morphology*, 1(1), 3–10.
- Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude : Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste* [Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d'Azur, Nice].

- Tirico, M. (2020). *Morphogenesis of complex networks: An application in urban growth* [Thèse de doctorat, Université Le Havre Normandie]. Le Havre: Université Le Havre Normandie.
- Roncayolo, M. (2002). *Lectures de villes : Formes et temps*. Marseille : Parenthèses.
- Vance, J. E. Jr. (1977). *This Scene of Man: The Role and Structure of the City in the Geography of Western Civilization*. New York, NY: Harper & Row.
- Sharpe, C. A. (1986). The teaching of urban morphogenesis. *Canadian Geographer*, 30(1), 53–59. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.1986.tb01025.x>.
- Alexander, C., Ishikawa, S., & Silverstein, M. (1977). *A pattern language: Towns, buildings, construction*. New York: Oxford University Press.
- Alexander, C. (1979). *The timeless way of building*. New York: Oxford University Press.
- Alexander, C. (2001). *The nature of order, Book One: The phenomenon of life*. Berkeley, CA: The Center for Environmental Structure.
- Porta, S., Rofè, Y. R., & Vidoli, M. P. (2015). *The city and the grid: Building beauty at large scale*. In M. Mehaffy (Ed.), *A city is not a tree: 50th anniversary edition* (pp. 163–181). Portland, OR: Sustasis Press.
- Mehaffy, M. W. (2015). *Notes on the genesis of wholes: “A city is not a tree” in the larger context of Alexander's career*. In M. W. Mehaffy (Ed.), *A city is not a tree: 50th anniversary edition* (pp. 123–144). Portland, OR: Sustasis Press.
- Caliskan, O. (2013). *Pattern formation in urbanism: A critical reflection on urban morphology, planning and design* [Thèse de doctorat, Université de technologie de Delft]. *A+BE | Architecture and the Built Environment*
- Lévy, A. (2012). La forme urbaine comme forme complexe : Une introduction à la morphologie urbaine. In .Franceschelli et al., (ED.) *Cycle de séminaires organisé par le PUCA* (pp. 20–30). Lyon, France : PUCA.
- Douady, C.-N. (2016). *La ville comme processus : Derrière la forme urbaine, quelle dynamique ? Essai*. Paris : L'Harmattan.
- Marcos, I. (2012). Urban morphogenesis. *Semiotica*, 2012(192), 1–14. <https://doi.org/10.1515/sem-2012-0077>.
- Batty, M. (2005). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Salingaros, N. A., Coward, L. A., West, B. J., & van Bilsen, A. (2005). *Principles of urban structure*. Amsterdam: Techne Press.
- Portugali, J. (2000). *Self-Organization and the City* [eBook edition]. Berlin: Springer-Verlag.
- Hillier, B. (1996). *Space is the machine: A configurational theory of architecture*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wohl, S. (2020). *Complex adaptive systems & urban morphogenesis: Analyzing and designing urban fabric informed by CAS dynamics* [Thèse de doctorat, Université de Technologie de Delft]. TU Delft Open.
- Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3), 229–265. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>.
- Kwinter, S. (2001). *Architectures of time: Toward a theory of the event in modernist culture* (eBook ed.). MIT Press.

- Hensel, M., et Menges, A. (2006). *Techniques and technologies in morphogenetic design* [Ebook edition]. Wiley-Academy.
- Weinstock, M. (2010). *The architecture of emergence: The evolution of form in nature and civilisation* (eBook ed.). Wiley.
- Pawlyn, M. (2016). *Biomimicry in architecture* (2nd ed.) [Ebook edition]. RIBA Publishing.
- Brioist, P. (2019, juin). Léonard de Vinci et la méthode biomimétique. Dans P. Brioist & L. Fagnard (Éds.), *62e colloque international d'études humanistes – Léonard de Vinci : invention et innovation, Tours, France*.
- Otto, F. (2009). *Occupying and connecting: Thoughts on territories and spheres of influence with particular reference to human settlement*. Stuttgart : Edition Axel Menges.
- Benyus, J. M. (2002). *Biomimicry: Innovation inspired by nature* [eBook]. Mariner Books.
- Kotnik, T. (2010). *Digital architectural design as exploration of computable functions*. *International Journal of Architectural Computing*, 8(1), 1–16. <https://doi.org/10.1260/1478-0771.8.1.1>.

. Chapitre 3

- Morin, E. (2005). *Introduction à la pensée complexe*. Paris : Points-Essais.
- Rey, A. (Éd.). (2009). *Le Petit Robert de la langue française 2009* (édition revue et corrigée). Paris : Dictionnaires Le Robert.
- Jeuge-Maynard, I. (Éd.). (2010). *Le Petit Larousse illustré 2010*. Paris : Larousse.
- Dauphiné, A. (2003). *Les théories de la complexité chez les géographes*. Paris : Anthropos (Économica).
- Miller, J. H. (2015). *A crude look at the whole: The science of complex systems in business, life, and society* [E-book]. Basic Books.
- Holland, J. H. (2014). *Complexity: A very short introduction* [E-book edition]. Oxford University Press.
- Morin, E. (1981). *La méthode. Tome 1 : La nature de la nature* (Points Essais, n° 123). Paris : Seuil.
- Sengupta, U. (2017). *Complexity science: The urban is a complex adaptive system* [eBook]. In D. Iossifova, C. Doll, & A. Gasparatos (Eds.), *Defining the urban* (1st ed., p. 17). Routledge.
- Balmaceda, B., et Fuentes, M. A. (2016). *Cities and methods from complexity science*. *Journal of Systems Science and Complexity*, 29(5), 1177–1186. <https://doi.org/10.1007/s11424-016-6084-2>.
- Siegenfeld, A. F., et Bar-Yam, Y. (2020). *An introduction to complex systems science and its applications*. *Complexity*, 2020, Article 6105872. <https://doi.org/10.1155/2020/6105872>.
- Crawford, R. (2016). *What can complexity theory tell us about urban planning?* New Zealand Productivity Commission. (Research Note 2016/2). ISBN 978-0-478-44032-4.
- Partanen, J., et Wallin, S. (2018). *Bridging soft and hard – Towards a more coherent understanding of self-organisation within urban complexity research*. *Finnish Journal of Urban Studies*, 55(3), 1–12. <https://www.yss.fi/journal/bridging-soft-and-hard/>.
- Alhadeff-Jones, M. (2008). *Three generations of complexity theories: Nuances and ambiguities*. *Educational Philosophy and Theory*, 40(1), 66–82. <https://doi.org/10.1111/j.1469-5812.2007.00411.x>.

- Stephan, J. (2019). *Complexité urbaine : langage et outils, le cas de Horsch Beyrouth* [Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay ; École doctorale des Sciences et de Technologie (Beyrouth)]. HAL. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02451244>.
- Ferreira, P. (2001). *Tracing complexity theory* (Research Seminar in Engineering Systems, pp. 1–26). Massachusetts Institute of Technology. <http://web.mit.edu/esd.83/www/notebook/ESD83-Complexity.doc>.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour* [eBook]. Oxford University Press.
- Theise, N. D. (2023). *Notes on complexity: A scientific theory of connection, consciousness, and being* [eBook]. Spiegel & Grau.
- Basili, L. L. (1998). The fractal geometry of urban organisation: Beyond the crisis of ‘spontaneous order’. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 267–295). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_8.
- Kallemeyn, L. M., Hall, J. N., & Gates, E. F. (2019). Exploring the relevance of complexity theory for mixed methods research. *Journal of Mixed Methods Research*, 14(3), 288–304. <https://doi.org/10.1177/1558689819872423>.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Champaign, IL: Wolfram Media.
- Bertalanffy, L. von. (1968). *General system theory: Foundations, development, applications*. New York: George Braziller Inc.
- West, G. (2017). *Scale: The universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies* [Ebook edition]. Penguin Press.
- Buš, P. (2015). *Emergence in urban environments: Agent-based simulation of environment reconfiguration* [Thèse de doctorat, Université technique tchèque de Prague, Faculté d’architecture, MOLAB 15116].
- Holland, J. H. (2023). *Emergence: From chaos to order* [eBook]. Oxford University Press.
- Johnson, S. B. (2001). *Emergence: The connected lives of ants, brains, cities, and software*. New York, NY: Scribner.
- Portugali, J. (2000). *Self-Organization and the City* [eBook edition]. Berlin: Springer-Verlag.
- Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude : Enjeux de connaissance pour le géographe et l’urbaniste* [Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d’Azur, Nice].
- Allen, P. M. (2005). *Cities and regions as self-organizing systems: Models of complexity* (eBook ed.). Taylor & Francis e-Library.
- Park, J.-J. (2010). *Morphogenèse de la ville contemporaine : Essai sur la multi-échelle* (Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Laboratoire de systèmes d’informations géographiques). Lausanne, Suisse : École polytechnique fédérale de Lausanne.
- Cambien, A. (2007). *Une introduction à l’approche systémique : Appréhender la complexité* [Rapport de recherche]. Lyon: Centre d’études sur les réseaux, les transports, l’urbanisme et les constructions publiques (CERTU).
- Castells, M. (2010). *The rise of the network society* (Vol. 1). Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423 ; 27(4), 623–656. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>.

- Turing, A. M. (1936). *On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem*. *Proceedings of the London Mathematical Society*, s2-42(1), 230–265. <https://doi.org/10.1112/plms/s2-42.1.230>.
- McCulloch, W. S., et Pitts, W. H. (1943). *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), 115–133. <https://doi.org/10.1007/BF02478259>.
- Wiener, N. (2019). *Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine* [Open Access edition]. Cambridge, MA: MIT Press. (*Œuvre originale publiée en 1948*).
- Prigogine, I., & Nicolis, G. (1967). On symmetry-breaking instabilities in dissipative systems. *The Journal of Chemical Physics*, 46(9), 3542–3550. <https://doi.org/10.1063/1.1841255>.
- Thom, R. (1977). Structural stability, catastrophe theory, and applied mathematics: The John von Neumann Lecture, 1976. *SIAM Review*, 19(2), 189–201. <https://doi.org/10.1137/1019036>.
- Maturana, H. R., & Varela, F. J. (1972). *Autopoiesis and cognition: The realization of the living*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (2nd ed.). Cambridge, MA: MIT Press.
- Kauffman, S. A. (1993). *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York: Oxford University Press.
- Bak, P. (1996). *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Copernicus/Springer.
- Morin, E. (1986). *La méthode 3 : La connaissance de la connaissance*. Paris: Le Seuil.
- Batty, M. (2005). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Batty, M. (2013). *The new science of cities* [eBook edition]. Cambridge, MA: MIT Press.
- O’Sullivan, D. B. (2000). *Graph-based cellular automaton models of urban spatial processes* [Thèse de doctorat, University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis]. Université de Londres.
- O’Sullivan, D. (2004). Complexity science and human geography. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 29(3), 282–295. <https://doi.org/10.1111/j.0020-2754.2004.00321.x>.
- Castellani, B., & Hafferty, F. W. (Eds.). (2009). *Sociology and Complexity Science: A New Field of Inquiry* (1re éd., Springer eBook). Springer.
- Pumain, D. (1998). Urban research and complexity. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 323–337). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_10.
- Wohl, S. (2020). *Complex adaptive systems & urban morphogenesis: Analyzing and designing urban fabric informed by CAS dynamics* [Thèse de doctorat, Université de Technologie de Delft]. TU Delft Open.
- Portugali, J. (2012). Complexity theories of cities: Achievements, criticism and potentials. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), *Complexity theories of cities have come of age* (pp. 47–62). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_4.
- Allen, P. M., et Sanglier, M. (1981). Urban evolution, self-organization, and decisionmaking. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 13(2), 167–183. <https://doi.org/10.1068/a130167>.
- Tobler, W. R. (1979). Cellular geography. In S. Gale & G. Olsson (Eds.), *Philosophy in geography* (Theory and Decision Library, Vol. 20, pp. 379–386). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-009-9394-5_18.

- Couclelis, H. (1985). Cellular worlds: A framework for modeling micro–macro dynamics. *Environment and Planning A*, 17(5), 585–596. <https://doi.org/10.1068/a170585>.
- White, R., & Engelen, G. (1993). Cellular automata and fractal urban form: A cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 25(8), 1175–1199. <https://doi.org/10.1068/a251175>.
- Batty, M., et Longley, P. (1994). *Fractal cities: A geometry of form and function* [eBook edition]. Academic Press.
- Frankhauser, P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Paris : Anthropos (collection « Villes »).
- Batty, M., & Marshall, S. (2012). The origins of complexity theory in cities and planning. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), *Complexity theories of cities have come of age* (pp. 21–45). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_3.
- Marshall, S. (2009). *Cities, design and evolution* (1re éd.) [eBook]. Routledge / Taylor & Francis.
- Portugali, J. (2006). *Complexity theory as a link between space and place*. *Environment and Planning A*, 38(4), 647–664. <https://doi.org/10.1068/a37260>.
- D’Acci, L. (2019). On urban morphology and mathematics. In L. D’Acci (Ed.), *The mathematics of urban morphology* (pp. 1–21). Birkhäuser. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12381-9_1.
- Batty, M. (2007). Model cities. *Town Planning Review*, 78(2), 125–151. <https://doi.org/10.3828/tpr.78.2.3>.
- Phelan, S. E. (2001). What is complexity science, really? *Emergence: A Journal of Complexity Issues in Organizations and Management*, 3(1), 120–136. https://doi.org/10.1207/S15327000EM0301_08.
- Sayama, H. (2016). Complex systems & network science: Background, state-of-the-art, future prospects, and applications to organizational science. 13th NetEco Symposium.

. Chapitre 4

- Akbar, J. A. (1994). Is there an Islamic city? *Journal of Architecture and Planning*, 6, 3–28. https://cap.ksu.edu.sa/ar/JAP_vol6.
- Jeuge-Maynard, I. (Éd.). (2010). *Le Petit Larousse illustré 2010*. Paris : Larousse.
- Rey, A. (Éd.). (2009). *Le Petit Robert de la langue française 2009* (édition revue et corrigée). Paris : Dictionnaires Le Robert.
- Lévy, J., et Lussault, M. (dir.). (2013). *Dictionnaire de géographie et de l’espace des sociétés*. Paris : Belin.
- Merlin, P., et Choay, F. (Éds.). (1996). *Dictionnaire de l’urbanisme et de l’aménagement* (2^e éd.). Paris : Presses Universitaires de France - PUF.
- Antoniou, J. (1981). *Islamic cities and conservation*. Paris : The Unesco Press.
- Mahdy, H. (2017). *Approaches to the conservation of Islamic cities: The case of Cairo*. Sharjah : ICCROM-ATHAR Regional Conservation Centre.
- Bianca, S. (2000). *Urban form in the Arab world: Past and present*. London: Thames & Hudson.
- Petrucchioli, A. (2008). House and fabric in the Islamic Mediterranean city. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petrucchioli, & A. Raymond (Eds.), *The city in the Islamic world* (Vol. 2, pp. 851–876). Leiden: Brill.

- Berardi, R. (2008). The spatial organization of Tunis Medina and other Arab-Muslim cities in North Africa and the Near East. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The city in the Islamic world* (Vol. 1, pp. 269–294). Leiden: Brill.
- Hakim, B. S. (1994). The 'Urf and its role in diversifying the architecture of traditional Islamic cities. *Journal of Architectural and Planning Research*, 11(4), 108–127. JSTOR. <https://www.jstor.org/stable/43029115>.
- Al-Hathloul, S. (1981). *Tradition, continuity and change in the physical environment: The Arab-Muslim city*. [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].
- Raydan, D., Ratti, C., et Steemers, K. (2004). Courtyards: a bioclimatic form?. In B. Edwards, M. Sibley, M. Hakmi, & P. Land (Eds.), *Courtyard housing: Past, present & future* (pp. 163–184). E-Taylor & Francis eBook.
- Sibley, M. (2004). Living traditions: The courtyard house as a model for contemporary domestic architecture. In B. Edwards, M. Sibley, M. Hakmi, & P. Land (Eds.), *Courtyard housing: Past, present & future* (pp. 143–162). E-Taylor & Francis eBook.
- Petruccioli, A. (2004). The courtyard houses of north African medinas, past, present and future. In B. Edwards, M. Sibley, M. Hakmi & P. Land (Éds.), *Courtyard Housing: Past, Present & Future* (pp. 11–26). E-Taylor & Francis eBook.
- Raymond, A. (1985). *Grandes villes arabes à l'époque ottomane*. Paris : Sindbad. (Collection Bibliothèque arabe).
- Mortada, H. (2003). *Traditional Islamic principles of the built environment* [eBook edition]. Routledge.
- Denoix, S. (2008). Founded cities of the Arab world from the seventh to the eleventh centuries. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The city in the Islamic world* (Vol. 1, pp. 115–139). Leiden: Brill.
- Von Grunebaum, G. E. (1955/2008). The Structure of the Muslim Town. In G. E. von Grunebaum (Ed.), *Islam: Essays on the Nature and Growth of a Cultural Tradition* (pp. 141–158). Abingdon: Routledge.
- Hakim, B. S. (2008). Law and the city. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The city in the Islamic world* (Vol. 1, pp. 71–92). Leiden: Brill.
- Raymond, A. (2008). The Spatial Organization of the City. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The City in the Islamic World* (Vol. 1, pp. 47–70). Leiden: Brill.
- Mostafa, S. L. (1981). *Al Madina al munawwara: Urban development and architectural heritage*. Beyrouth : Dar al-Nahda al-Arabia.
- Akbar, J. A. (1984). *Responsibility and the traditional Muslim built environment* [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].
- Alsayyad, N. (1991). *Cities and caliphs: On the genesis of Arab Muslim urbanism*. New York, NY: Greenwood Press.
- Kuhn, T. S. (1972). *La structure des révolutions scientifiques* (L. Meyer, Trad.). Paris : Flammarion. (Ouvrage original publié en 1962).
- Haneda, M. (2013). *Islamic urban studies: Historical review and perspectives* [eBook edition]. London: Routledge. (Ouvrage original publié en 1994).
- Cresti, F. (2005). La population d'Alger et son évolution durant l'époque ottomane : Un état des connaissances controversé. *Arabica*, 52(4), 457–495. <https://doi.org/10.1163/157005805774320240>.

- Said, E. W. (1980). *L'orientalisme*. Paris : Éditions du Seuil.
- Neglia, G. A. (2008). Some historiographical notes on the Islamic city with particular reference to the visual representation of the built city. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The City in the Islamic World* (Vol. 1, pp. 1–46). Leiden: Brill. <https://doi.org/10.1163/ej.9789004162402.i-1500.6>.
- Al-Lahham, A. (2004). Orientalism in the readings of Muslim built environments. *Journal of Architecture and Planning*, 16, 95–174. https://cap.ksu.edu.sa/ar/JAP_vol16.
- Abu-Lughod, J. L. (1987). The Islamic city: Historic myth, Islamic essence, and contemporary relevance. *International Journal of Middle East Studies*, 19(2), 155–176. <https://doi.org/10.1017/S0020743800031822>.
- Raymond, A. (1994). Islamic city, Arab city: Orientalist myths and recent views. *British Journal of Middle Eastern Studies*, 21(1), 3–18. <https://www.jstor.org/stable/195564>.
- Allain, R. (2004). *Morphologie urbaine : Géographie, aménagement et architecture de la ville* (Coll. U Géographie). Paris : Armand Colin.
- Massignon, L. (1935). Explication du plan de Kufa (Irak). In P. Jouguet (Dir.), *Mélanges Maspero III: Orient islamique* (pp. 337–360). Le Caire: Mémoires de l'Institut français d'archéologie orientale.
- Cahen, C. (1955). L'Histoire économique et sociale de l'Orient musulman médiéval. *Studia Islamica* (No. 3), 93–115. <https://doi.org/10.2307/1595104>.
- Lapidus, I. M. (1967). *Muslim Cities in the Later Middle Ages*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Petruccioli, A. (2002). New methods of reading the urban fabric of the Islamicized Mediterranean. *Built Environment*, 28(3), 202–216. <https://www.jstor.org/stable/23288452>.
- Hourani, A. H., & Stern, S. M. (Eds.). (1970). *The Islamic city: A colloquium* (Papers on Islamic History, 1). Oxford : University of Oxford, Near Eastern Group.
- Ilbert, R. (1982). La ville islamique : Réalité et abstraction. *Les Cahiers de la recherche architecturale*, 10–11, 6–14.
- Guichard, P. (1998). Les villes d'al-Andalus et de l'Occident musulman aux premiers siècles de leur histoire : Une hypothèse récente. In *Genèse de la ville islamique en al-Andalus et au Maghreb occidental* (pp. 37–52). Madrid : Casa de Velázquez.
- Djaït, H. (1986). *Al-Kūfa : Naissance de la ville islamique*. Paris : Maisonneuve et Larose.
- Kuban, D. (1985). *Muslim religious architecture* (Iconography of Religions, Section 22, Islam, No. 1). Leiden: Brill Academic Pub.
- Rudofsky, B. (1964). *Architecture without architects: An introduction to nonpedigreed architecture*. New York, NY: Museum of Modern Art.
- Rapoport, A. (1969). *House form and culture*. London : Pearson.
- BenHamouche, M. (2003). Decision-making system and urban geometry in traditional Muslim cities: The case of Algiers 1516–1830. *Journal of Architectural and Planning Research*, 20(4), 307–322. <https://www.jstor.org/stable/43030669>.
- Hakim, B. S. (1986). *Arabic Islamic cities: Building and planning principles*. London: Routledge.
- Brunschvig, R. (1947). Urbanisme médiéval et droit musulman. *Revue des Études Islamiques*, 15, 125-155.

Azab, K. (2013). *Fiqh al-oumran: Al-imara wal moujtamae wal dawla fi al-hadara al-islamia*. Le Caire: Egyptian-Lebanese Publishing House.

Ben Hamouche, M. (2009). Can chaos theory explain complexity in urban fabric? Applications in traditional Muslim settlements. In K. Williams (Ed.), *Nexus network journal* (Vol. 11, No. 2). Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8976-5_6.

. Chapitre 5

Hachi, R. (2020). *Explorer l'effet de la morphologie des réseaux viaires sur leurs conditions d'accessibilité : Une approche empirique fondée sur la théorie des graphes* [Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne].

Caliskan, O. (2013). *Pattern formation in urbanism: A critical reflection on urban morphology, planning and design* [Thèse de doctorat, Technische Universiteit Delft].

Marshall, S. (2005). *Streets & patterns* (e-book edition). Taylor & Francis e-Library.

Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude : Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste* [Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d'Azur, Nice].

Oliveira, V. (2016). *Urban morphology: An introduction to the study of the physical form of cities* (ebook ed.). Cham: Springer.

Merlin, P., et Choay, F. (Éds.). (1996). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement* (2^e éd.). Paris : Presses Universitaires de France - PUF.

Choay, F. (1965). *L'urbanisme : Utopies et réalités. Une anthologie*. Paris : Éditions du Seuil.

Choay, F. (2009). *Le patrimoine en questions : Anthologie pour un combat*. Paris : Seuil.

Clair, É. (2014). *Réconcilier ville et voirie ou l'enjeu d'un rapprochement entre mobilité et urbanité : dynamiques et perspectives sur le réseau viaire structurant de Bourg-en-Bresse* [Thèse de doctorat, Université de Lyon].

Brès, A. (1998). Le système des voies urbaines : entre réseau et espace. *Flux*, 34(4), 4-20. <https://doi.org/10.3406/flux.1998.1225>.

Barles, S. (2011). Les villes transformées par la santé, XVIIIe-XXe siècles. *Les Tribunes de la santé*, 33(4), 31-37. <https://doi.org/10.3917/seve.033.0031>.

Le Corbusier. (1994). *Urbanisme*. Paris : Flammarion. (Œuvre originale publiée en 1925, coll. « L'Esprit Nouveau »)

Le Corbusier. (1971). *La Charte d'Athènes* (Rééd. de l'éd. originale de 1943). Paris : Éditions du Seuil.

Frampton, K. (1983). Towards a Critical Regionalism: Six Points for an Architecture of Resistance. In H. Foster (Ed.), *The Anti-Aesthetic: Essays on Postmodern Culture* (pp. 16-30). Winnipeg : Bay Press.

Jacobs, J. (1991). *Déclin et survie des grandes villes américaines* (Trad. de l'anglais). Liège: Mardaga. (Œuvre originale publiée en 1961 sous le titre *The Death and Life of Great American Cities*)

Alexander, C. (1965). A city is not a tree. *Architectural Forum*, 122(1), 58-62.

Krier, R. (1978). Typological and morphological elements of the concept of urban space (Vol. 49). *Architectural Design Magazine*.

https://openlibrary.org/works/OL33073830W/Typological_and_morphological_elements_of_the_concept_of_urban_space.

Gehl, J. (1971). *Life between buildings: Using public space*. Copenhagen : Arkitektens Forlag.

Dupuis, B. (2009). Le mouvement du New Urbanism et le paysage urbain : La circulation d'une doctrine urbanistique. *Articulo - Journal of Urban Research*, (Special issue 2). <https://doi.org/10.4000/articulo.1133>.

Cozens, P., et Hillier, D. (2008). The shape of things to come: New urbanism, the grid and the cul-de-sac. *International Planning Studies*, 13(1), 51-73.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13563470801969962>.

Choay, F. (1996). *La règle et le modèle : Sur la théorie de l'architecture et de l'urbanisme*. Paris : Éditions du Seuil.

Benevolo, L. (2000). Histoire de la ville (Rééd. de l'éd. orig. 1983). Paris : Parenthèses.

Kostof, S. (1991). *The city shaped: Urban patterns and meanings through history*. London : Thames & Hudson.

Douady, C.-N. (2014). *De la trace à la trame : La voie, lecture du développement urbain*. Paris : L'Harmattan.

Fankhauser, P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Paris : Anthropos (collection « Villes »).

Southworth, M., et Ben-Joseph, E. (1995). Street standards and the shaping of suburbia. *Journal of the American Planning Association*, 61(1), 65-81. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01944369508975620>.

Nilsson, L., et Gil, J. (2019). The signature of organic urban growth. In L. D'Acci (Ed.), *The mathematics of urban morphology* (pp. 95–110). Cham : Birkhäuser.

Al-Hathloul, S. (1981). *Tradition, continuity and change in the physical environment: The Arab-Muslim city*. [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].

Mortada, H. (2003). *Traditional Islamic principles of the built environment* [eBook edition]. Routledge.

Akbar, J. A. (1984). *Responsibility and the traditional Muslim built environment* [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].

Hakim, B. S. (1986). *Arabic Islamic cities: Building and planning principles*. London: Routledge.

Hentati, N. (2003). La rue dans la ville de l'Occident musulman médiéval d'après les sources juridiques malikites. *Arabica*, 50(3), 273-305. Brill. <https://www.jstor.org/stable/4057631>.

Ben Hamouche, M. (2009). Can chaos theory explain complexity in urban fabric? Applications in traditional Muslim settlements. In K. Williams (Ed.), *Nexus network journal* (Vol. 11, No. 2). Birkhäuser Basel.
https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8976-5_6.

Van Staëvel, J.-P. (2002). Les fondements de l'ordre urbain dans le monde arabe médiéval : Réflexions à propos de Cordoue au X^e siècle. *Géocarrefour*, 77(3), 225-234. <https://doi.org/10.3406/geoca.2002.2747>.

Brunschvig, R. (1947). Urbanisme médiéval et droit musulman. *Revue des Études Islamiques*, 15, 125-155.

Douady, C.-N. (2016). *La ville comme processus : Derrière la forme urbaine, quelle dynamique ? Essai*. Paris : L'Harmattan.

. Chapitre 6

- Mandelbrot, B. (1967). How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 156(3775), 636–638. <https://equant.org/articles/fractal-geometry/img/howLongIsTheCoastOfBritain.pdf>.
- Mandelbrot, B. (1982). *The fractal geometry of nature*. San Francisco: W. H. Freeman.
- Gleick, J. (2011). *Chaos: Making a new science* [eBook edition]. New York, NY: Open Road Media.
- Debnath, L. (2006). A brief historical introduction to fractals and fractal geometry. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 37(1), 29–50. <https://doi.org/10.1080/00207390500186206>.
- Dauphiné, A. (2011). *Géographie fractale : Fractals auto-similaire et auto-affine*. Paris : Hermès-Lavoisier.
- Barnsley, M. F. (2014). *Fractals everywhere* (2nd ed.) [eBook edition]. Academic Press.
- Falconer, K. (2003). *Fractal geometry: Mathematical foundations and applications* (2nd ed.) [eBook edition]. Wiley.
- Eglash, R. (1999). *African fractals: Modern computing and indigenous design*. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press.
- Frankhauser, P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Paris : Anthropos (collection « Villes »).
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour* [eBook]. Oxford University Press.
- Theise, N. D. (2023). *Notes on complexity: A scientific theory of connection, consciousness, and being* [eBook]. Spiegel & Grau.
- Batty, M. (2005). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Balmaceda, B., et Fuentes, M. A. (2016). Cities and methods from complexity science. *Journal of Systems Science and Complexity*, 29(5), 1177–1186. <https://doi.org/10.1007/s11424-016-6084-2>.
- Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude : Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste* [Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d'Azur, Nice].
- Dauphiné, A. (2003). *Les théories de la complexité chez les géographes*. Paris : Anthropos (Économica).
- Vicsek, T. (1992). *Fractal growth phenomena* (2nd ed.). Singapore: World Scientific.
- Turcotte, D. L. (2012). *Fractals and chaos in geology and geophysics* (2nd ed.). Cambridge, UK : Cambridge University Press.
- West, G. B., Brown, J. H., & Enquist, B. J. (1997). A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*, 276(5309), 122–126. <https://doi.org/10.1126/science.276.5309.122>.
- Goldberger, A. L., Amaral, L. A. N., Hausdorff, J. M., Ivanov, P. C., Peng, C.-K., & Stanley, H. E. (2002). Fractal dynamics in physiology: Alterations with disease and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(suppl 1), 2466–2472. <https://doi.org/10.1073/pnas.012579499>.
- Batty, M., et Longley, P. (1994). *Fractal cities: A geometry of form and function* [eBook edition]. Academic Press.

- Basili, L. L. (1998). The fractal geometry of urban organisation: Beyond the crisis of 'spontaneous order'. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 267–295). Heidelberg: Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_8.
- Wagner, R. (1991). The fractal person. In M. Godelier & M. Strathern (Eds.), *Big men and great men: Personifications of power in Melanesia* (pp. 159–173). Cambridge University Press.
- Mosko, M. S. (2009). The fractal yam: Botanical imagery and human agency in the Trobriands. *Journal of the Royal Anthropological Institute*, 15(4), 679–700. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9655.2009.01579.x>.
- Sokal, A., et Bricmont, J. (1998). *Fashionable nonsense: Postmodern intellectuals' abuse of science*. New York, NY: Picador.
- Cilliers, P. (1998). *Complexity and postmodernism: Understanding complex systems*. London : Routledge.
- Oswald, M. (2009). *Fractals architecture : Knowledge formation within and between architecture and the sciences of complexity*. Berlin: Jovis Verlag.
- Haghani, T. (2009). *Fractal geometry, complexity and the nature of urban morphological evolution: Developing a fractal analysis tool to assess urban morphological change at neighbourhood level* [Thèse de doctorat, Birmingham City University]. Grande Bretagne, Birmingham City University.
- Bertuglia, C. S., Bianchi, G., et Mela, A. (1998). Introduction. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 1–18). Heidelberg: Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_1.
- Pumain, D. (1998). Urban research and complexity. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 323–337). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_10.
- Salingaros, N. A., Coward, L. A., West, B. J., et van Bilsen, A. (2005). *Principles of urban structure*. Amsterdam: Techne Press.
- Oliveira, V. (2016). *Urban morphology: An introduction to the study of the physical form of cities*. Cham : Springer International Publishing.
- Jiang, B., & Yin, J. (2013). Ht-index for quantifying the fractal or scaling structure of geographic features. *Annals of the Association of American Geographers*, 104(3), 530–540. <https://doi.org/10.1080/00045608.2013.834239>.
- Jiang, B., & Ma, D. (2018). How complex is a fractal? Head/tail breaks and fractional hierarchy. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 2(1), Article 6. <https://doi.org/10.1007/s41651-017-0009-z>.
- Frankhauser, P. (1998). Fractal geometry of urban patterns and their morphogenesis. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2(4), 347–357. <https://doi.org/10.1155/S1026022698000107>.
- Terzi, F., et Kaya, H. S. (2011). Dynamic spatial analysis of urban sprawl through fractal geometry: The case of Istanbul. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 38(1), 175–190. <https://doi.org/10.1068/b35096>.
- Tucek, P., & Janoska, Z. (2013). Fractal dimension as a descriptor of urban growth dynamics. *Neural Network World*, 23(2), 93–102. <https://doi.org/10.14311/NNW.2013.23.007>.
- Chen, Y. (2020). Fractal modeling and fractal dimension description of urban morphology. *Entropy*, 22(9), 961. <https://doi.org/10.3390/e22090961>.
- Man, X., et Chen, Y. (2020). Fractal-based modeling and spatial analysis of urban form and growth: A case study of Shenzhen in China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11), 672. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110672>.

- McAdams, M. A. (2007). Fractal analyses and the urban morphology of a city in a developing country: A case study of İstanbul. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 15, 150–171. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/3133>.
- Feng, J., & Chen, Y. (2010). Spatiotemporal evolution of urban form and land-use structure in Hangzhou, China: Evidence from fractals. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(5), 838–856. <https://doi.org/10.1068/b35078>.
- Chen, Y.-G. (2018). Logistic models of fractal dimension growth of urban morphology. *Fractals*, 26(3), 1850033. <https://doi.org/10.1142/S0218348X18500330>.
- Kim, J. S., Goh, K.-I., Kahng, B., & Kim, D. (2007). Fractality and self-similarity in scale-free networks. *New Journal of Physics*, 9(6), 177. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/9/6/177>.
- Lu, Z., Zhang, H., Southworth, F., & Crittenden, J. (2016). Fractal dimensions of metropolitan area road networks and the impacts on the urban built environment. *Ecological Indicators*, 70, 285–296. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X16303168?via%3Dihub>.
- Benguigui, L. (1992). The fractal dimension of some railway networks. *Journal de Physique I*, 2(4), 385–388. <https://doi.org/10.1051/jp1:1992151>.
- Benguigui, L. (1995). A fractal analysis of the public transportation system of Paris. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 27(7), 1147–1161. <https://doi.org/10.1068/a271147>.
- Rodin, V., et Rodina, E. (2000). The fractal dimension of Tokyo's streets. *Fractals*, 8(4), 413–418. <https://doi.org/10.1142/S0218348X00000457>.
- Lu, Y., et Tang, J. (2004). Fractal dimension of a transportation network and its relationship with urban growth: A study of the Dallas-Fort Worth area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(6), 895–911. <https://doi.org/10.1068/b3163>.
- Sun, Z., Jia, P., Kato, H., & Hayashi, Y. (2007). Distributive continuous fractal analysis for urban transportation network. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 7, 1519–1531. <https://sunzhuo.users.sourceforge.net/res/100457.pdf>.
- Mo, Y., Liu, J., & Lv, S. (2015). GIS-based analysis of fractal features of the urban road network. *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, 845–848. <https://doi.org/10.1109/ICSESS.2015.7339187>.
- Zhang, H., Lan, T., & Li, Z. (2021). Fractal evolution of urban street networks in form and structure: A case study of Hong Kong. *International Journal of Geographical Information Science*, 36(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/13658816.2021.1974451>.
- Lu, Z., Zhang, H., Southworth, F., & Crittenden, J. (2016). Fractal dimensions of metropolitan area road networks and the impacts on the urban built environment. *Ecological Indicators*, 70, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.016>.
- Kim, K. S., Benguigui, L., & Marinov, M. (2003). The fractal structure of Seoul's public transportation system. *Cities*, 20(1), 31–39. [https://doi.org/10.1016/S0264-2751\(02\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0264-2751(02)00094-X).
- Xu, Z., Xing, L., Zhou, F., & Wang, Y. (2010). Fractal characteristics of transportation network of Tianjin city. In 2010 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA) (pp. 356–359). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2010.5588295>.

- Ma, D., Guo, R., Zheng, Y., Zhao, Z., He, F., & Zhu, W. (2020). Understanding Chinese urban form: The universal fractal pattern of street networks over 298 cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), Article 192. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040192>.
- De Keersmaecker, M.-L., Frankhauser, P., & Thomas, I. (2003). Using fractal dimensions to characterize intra-urban diversity: The example of Brussels. *Geographical Analysis*, 35(4), 310–328. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2003.tb01117.x>.
- Thomas, I., Frankhauser, P., & De Keersmaecker, M.-L. (2013). Fractal dimensions of the built-up footprint: Buildings versus roads. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40(2), 310–329. <https://doi.org/10.1068/b38218>.
- Wang, H., Luo, S., & Luo, T. (2017). Fractal characteristics of urban surface transit and road networks: Case study of Strasbourg, France. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(2), 1–10. <https://doi.org/10.1177/1687814017692289>.
- Pumain, D. (2017). *About fractal models in urban geography and planning: Refuting the aesthetics and the universal norm* [Cybergeog Conversation]. <https://cybergeog.hypotheses.org/22>.
- Terzi, F., & Kaya, H. S. (2008). *Analyzing urban sprawl patterns through fractal geometry: The case of Istanbul metropolitan area* [Discussion Paper]. Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), University College London. <https://discovery.ucl.ac.uk/15200/>.
- Chen, Y. (2012). Fractal dimension evolution and spatial replacement dynamics of urban growth. *Chaos, Solitons & Fractals*, 45(2), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2011.10.007>.
- Jevric, M., & Romanovich, M. (2016). Fractal dimensions of urban border as a criterion for space management. *Procedia Engineering*, 165, 1478–1482. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.882>.
- Nie, Q., Xu, J., & Liu, Z. (2015). Fractal and multifractal characteristic of spatial pattern of urban impervious surfaces. *Earth Science Informatics*, 8(2), 381–392. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0159-1>.
- Tannier, C., Vuidel, G., Houot, H., & Frankhauser, P. (2012). Spatial accessibility to amenities in fractal and nonfractal urban patterns. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 39(5), 801–819. <https://doi.org/10.1068/b37132>.
- Wilson, A. (2000). *Complex spatial systems: The modelling foundations of urban and regional analysis* [eBook edition]. Pearson Education Limited.
- Turner, J. R., & Baker, R. M. (2019). Complexity theory: An overview with potential applications for the social sciences. *Systems*, 7(1), 4. <https://doi.org/10.3390/systems7010004>.
- Ostwald, M. J. (2009). *Fractal architecture: Knowledge formation within and between architecture and the sciences of complexity*. Saarbrücken : VDM Verlag Dr. Müller.
- Bovill, C. (1996). *Fractal geometry in architecture and design* (1st ed.) [E-book]. Boston, MA: Birkhäuser.
- Lorenz, W. E. (2003). *Fractals and fractal architecture* [Thèse de doctorat, Faculté d'architecture et d'aménagement de l'espace, Université technique de Vienne]. <https://doi.org/10.13140/2.1.3850.9606>.
- Harris, J. (2012). *Fractal architecture: Organic design philosophy in theory and practice* (Ebook ed.). University of New Mexico Press.
- Ostwald, M. J. (2001). "Fractal Architecture": Late twentieth century connections between architecture and fractal geometry. *Nexus Network Journal*, 3(1), 73–84. <https://doi.org/10.1007/s00004-000-0006-1>.

- Cooper, J., & Oskrochi, R. (2008). Fractal analysis of street vistas: A potential tool for assessing levels of visual variety in everyday street scenes. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(2), 349–363. <https://doi.org/10.1068/b33081>.
- Stamps, A. E. (2002). Fractals, skylines, nature and beauty. *Landscape and Urban Planning*, 60(3), 163–184. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00054-3).
- Joye, Y. (2007). Fractal architecture could be good for you. *Nexus Network Journal*, 9(3), 311–320. <https://doi.org/10.1007/s00004-007-0045-y>.
- Jencks, C. (1997). *The architecture of the jumping universe* (2nd ed.) [eBook]. John Wiley & Sons.
- Rian, I. M., Park, J.-H., Ahn, H. U., & Chang, D. (2007). Fractal geometry as the synthesis of Hindu cosmology in Kandariya Mahadev temple, Khajuraho. *Building and Environment*, 42(12), 4093–4107. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.028>.
- Sala, N. (2006). Fractal geometry and architecture: Some interesting connections. *WIT Transactions on the Built Environment*, Vol. 86, 163–172. https://doi.org/10.2495/ARC060171.*
- Ostwald, M. J., et Vaughan, J. (2016). Introducing the box-counting method. In *The fractal dimension of architecture* (Vol. 1, pp. 39–66). Birkhäuser, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32426-5_3.
- Ben Hamouche, M. (2009). Can chaos theory explain complexity in urban fabric? Applications in traditional Muslim settlements. In K. Williams (Ed.), *Nexus network journal* (Vol. 11, No. 2). Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8976-5_6.
- Ben Hamouche, M. (2011). Fractal geometry in Muslim cities: How succession law shaped morphology. *Nexus Network Journal*, 13(2), 235–251. <https://doi.org/10.1007/s00004-011-0062-8>.
- Reza, E., et Dincyurek, O. (2016). The interpretation of vernacular architecture through fractal models: In the case of Iran, Masouleh village. In G. Amoroso (Ed.), *Handbook of research on visual computing and emerging geometrical design tools* (pp. 55–77). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0029-2.ch003>.
- Abdelsalam, M., et Ibrahim, M. S. (2019). Fractal dimension of Islamic architecture: The case of the Mameluke madrasas: Al-Sultan Hassan Madrasa. *Gazi University Journal of Science*, 32(1). <http://dergipark.gov.tr/gujs/issue/43586/414947>.
- Rezazade, H. (2022). Visual and structural analysis of fractal geometry in the Sheikh Lotfollah Mosque ornaments (Isfahan-Iran). *International Journal of Architecture and Urban Development*, 12(3), 45–56. <https://doi.org/10.30495/IJAUD.2021.16769>.
- Patuano, A., et Lima, M. F. (2021). The fractal dimension of Islamic and Persian four-folding gardens. *Humanities and Social Sciences Communications*, 8, 86. <https://doi.org/10.1057/s41599-021-00766-1>.

. Chapitre 7

- Bertalanffy, L. von. (1968). *General system theory: Foundations, development, applications*. New York: George Braziller Inc.
- Tirico, M. (2020). *Morphogenesis of complex networks: An application in urban growth* [Thèse de doctorat, Université Le Havre Normandie]. Le Havre : Université Le Havre Normandie.
- Le Moigne, J.-L. (1974). *Les systèmes de décision dans les organisations*. Paris: Presses Universitaires de France.

- Cambien, A. (2007). *Une introduction à l'approche systémique : Appréhender la complexité* [Rapport de recherche]. Lyon: Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU).
- Morin, E. (1986). *La méthode 3 : La connaissance de la connaissance*. Paris: Le Seuil.
- Valéry, P. (1973). *Cahiers*. Paris: Gallimard.
- Maturana, H. R. (1988). Ontology of observing: The biological foundations of self-consciousness and of the physical domain of existence. In R. E. Donaldson (Ed.), *Texts in cybernetic theory: An in-depth exploration of the thought of Humberto Maturana, William T. Powers, and Ernst von Glasersfeld* (pp. 1–53). American Society for Cybernetics (ASC).
- Le Moigne, J.-L. (2006). *La théorie du système général : Théorie de la modélisation* (4^e éd. mise à jour). Paris : Presses Universitaires de France.
- Nakajima, T. (2004). Synchronic and diachronic hierarchies of living systems. *International Journal of General Systems*, 33(5), 505–526. <https://doi.org/10.1080/0308107042000193525>
- Pumain, D. (2006b). Systèmes de villes et niveaux d'organisation. In P. Bourguin & A. Lesne (Eds.), *Morphogenèse. L'origine des formes* (pp. 239–263). Paris: Belin.
- Oliveira, V. (2016). The study of urban form: Different approaches. In *Urban morphology: An introduction to the study of the physical form of cities* (pp. 87–149). Cham: Springer.
- Batty, M. (2007). Model cities. *Town Planning Review*, 78(2), 125–151. <https://doi.org/10.3828/tpr.78.2.3>
- Schmitt, G. (2013). Spatial modeling issues in future smart cities. *Geo-Spatial Information Science*, 16(1), 7–12. <https://doi.org/10.1080/10095020.2013.774107>
- Haggett, P. (1965). *Locational analysis in human geography*. Edward Arnold.
- Lévy, J., & Lussault, M. (Eds.). (2003). *Dictionnaire de la géographie*. Paris: Belin.
- Banos, A. (2013). *Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en géographie et SHS* [Habilitation à diriger des recherches, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne].
- Pumain, D. (1997). Pour une théorie évolutive des villes. *L'Espace géographique*, 26(2), 119–134. <https://doi.org/10.3406/spgeo.1997.1063>
- Strang, G. (2009). *Introduction to linear algebra* (4th ed.) [eBook edition]. Wellesley-Cambridge Press.
- West, G. (2017). *Scale: The universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies* [Ebook edition]. Penguin Press.
- Batty, M., et Longley, P. (1994). *Fractal cities: A geometry of form and function* [eBook edition]. Academic Press.
- Batty, M. (2005). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Frankhauser, P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Paris : Anthropos (collection « Villes »).
- Pumain, D. (1998). Urban research and complexity. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 323–337). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_10.
- Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude : Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste* [Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d'Azur, Nice].

- Christaller, W. (1966). *Central places in southern Germany* (C. W. Baskin, Trans.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. (Œuvre originale publiée en 1933 sous le titre *Die zentralen Orte in Süddeutschland*).
- Reilly, W. J. (1931). *The law of retail gravitation*. New York: Knickerbocker Press.
- Loos, A. (1908/1998). Ornament and crime. In A. Loos, *Ornament and crime: Selected essays* (pp. 167–176). Riverside, CA: Ariadne Press.
- Le Corbusier. (1994). *Urbanisme*. Paris : Flammarion. (Œuvre originale publiée en 1925, coll. « L'Esprit Nouveau »)
- Le Corbusier. (1971). *La Charte d'Athènes* (Rééd. de l'éd. originale de 1943). Paris : Éditions du Seuil.
- Jacobs, J. (1991). *Déclin et survie des grandes villes américaines* (Trad. de l'anglais). Liège: Mardaga. (Œuvre originale publiée en 1961 sous le titre *The Death and Life of Great American Cities*)
- Alexander, C. (1965). A city is not a tree. *Architectural Forum*, 122(1), 58–62.
- Batty, M. (2013). *The new science of cities* [eBook edition]. Cambridge, MA: MIT Press.
- Wiener, N. (2019). *Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine* [Open Access edition]. Cambridge, MA: MIT Press. (Œuvre originale publiée en 1948).
- Portugali, J. (2000). *Self-Organization and the City* [eBook edition]. Berlin: Springer-Verlag.
- Portugali, J. (2012). Complexity theories of cities: Achievements, criticism and potentials. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), *Complexity theories of cities have come of age* (pp. 47–62). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_4
- Allen, P. M., et Strathern, M. (2008). Complexity: The integrating framework for models of urban and regional systems. In S. Albeverio, D. Andrey, P. Giordano & A. Vancheri (Eds.), *The Dynamics of Complex Urban Systems* (pp. 21–41). Heidelberg: Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1937-3_2.
- Allen, P. M. (2005). *Cities and regions as self-organizing systems: Models of complexity* (eBook ed.). Taylor & Francis e-Library.
- Alexander, C., Ishikawa, S., & Silverstein, M. (1977). *A Pattern Language: Towns, buildings, construction*. New York, NY: Oxford University Press.
- Boeing, G. (2019). Urban spatial order: street network orientation, configuration, and entropy. *Applied Network Science*, 4(1), 67. <https://doi.org/10.1007/s41109-019-0189-1>.
- Chen, Y., et Huang, L. (2018). *Spatial measures of urban systems: From entropy to fractal dimension*. *Entropy*, 20(12), 991. <https://doi.org/10.3390/e20120991>.
- Salingeros, N. A. (2005). *Principles of urban structure*. Amsterdam : Techne Press.
- Wilson, A. G. (2024). *Complex spatial systems: The modelling foundations of urban and regional analysis* [eBook edition]. Routledge.
- Boeing, G. (2018). Measuring the complexity of urban form and design. *Urban Design International*, 23(4), 281–292. <https://doi.org/10.1057/s41289-018-0072-1>.
- Dauphiné, A. (2011). *Géographie fractale : Fractals auto-similaire et auto-affine*. Paris : Hermès-Lavoisier.
- Bretagnolle, A., Daudé, É., & Pumain, D. (2006). From theory to modelling: Urban systems as complex systems. *Cybergeog: European Journal of Geography*, Dossier 335, 1–17. <https://doi.org/10.4000/cybergeog.2420>.

- Torrens, P. M. (2000). How cellular models of urban systems work (CASA Working Paper No. 28). Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London.
- Plazanet, C., & Berger, P. (2008). *Morphogenèse de la métropole : Rapport final* (Projet de recherche interdisciplinaire EPFL / VPAA / Fonds 590612). Lausanne, Suisse : EPFL, Laboratoire UTA.
- Silva, V. (2010). *Conception et évaluation d'un prototype de simulation de la morphogenèse urbaine par agents vecteurs multi-échelles* [Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Laboratoire de systèmes d'informations géographiques]. Lausanne, Suisse : EPFL.
- Park, J.-J. (2010). *Morphogenèse de la ville contemporaine : Essai sur la multi-échelle* [Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Laboratoire de systèmes d'informations géographiques]. Lausanne, Suisse : EPFL.
- Dauphiné, A. (2003). *Les théories de la complexité chez les géographes*. Paris : Anthropos (Économica).
- Le Moigne, J.-L. (1990). *La modélisation des systèmes complexes*. Paris : Dunod.
- Holland, J. H. (2023). *Emergence: From chaos to order* [eBook]. Oxford University Press.
- Frigg, R., et Hartmann, S. (2020). "Models in Science." In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2020 Edition).
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour* [eBook]. Oxford University Press.
- Timmermans, H. (2012). On the simplicity of complexity theory in artificial environments. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), *Complexity theories of cities have come of age* (pp. 175–189). Berlin/Heidelberg, Allemagne : Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_10.
- Batty, M., & Marshall, S. (2012). The origins of complexity theory in cities and planning. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), *Complexity theories of cities have come of age* (pp. 21–45). Berlin, Germany : Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_3.
- Gurr, J. M. (2014). 'Urban Complexity' from a Literary and Cultural Studies Perspective: Key Cultural Dimensions and the Challenges of 'Modeling'. In C. Walloth, J. M. Gurr, & J. A. Schmidt (Eds.), *Understanding Complex Urban Systems: Multidisciplinary Approaches to Modeling* (pp. 133–150). Berlin/Heidelberg, Germany : Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_10.
- Douady, S. (2014). Une modélisation de la morphogenèse urbaine ? In C.-N. Douady & Morphocité (Éds.), *De la trace à la trame : La voie, lecture du développement urbain* (pp. 147–150). Paris, France : L'Harmattan.
- Lesne, A., & Bourguine, P. (2006). Introduction. In P. Bourguine & A. Lesne (Eds.), *Morphogenèse : L'origine des formes* (pp. 13–26). Paris : Éditions Belin.
- Morin, E. (2005). *Introduction à la pensée complexe*. Paris : Points-Essais.
- Donnadieu, G., et Karsky, M. (2002). *Penser la complexité : Modéliser pour comprendre*. Paris : L'Harmattan.
- Benenson, I., et Torrens, P. M. (2004). *Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena* [eBook edition]. Wiley.
- Wohl, S. (2020). *Complex adaptive systems & urban morphogenesis: Analyzing and designing urban fabric informed by CAS dynamics* [Thèse de doctorat, Université de Technologie de Delft]. TU Delft Open.
- Mazzocchi, F. (2016). Complexity, network theory, and the epistemological issue. *Kybernetes*, 45(7), 1158–1170. <https://doi.org/10.1108/K-10-2015-0252>.

- El Gouj, H., Rincón-Acosta, C., & Lagesse, C. (2022). Urban morphogenesis analysis based on geohistorical road data. *Applied Network Science*, 7(1), Article 6. <https://doi.org/10.1007/s41109-021-00440-0>.
- Neal, Z. P. (2013). *How networks are shaping the modern metropolis* [Ebook edition]. Routledge.
- Dupuy, G. (1991). *L'urbanisme des réseaux: Théories et méthodes*. Paris: Armand Colin.
- Boeing, G. (2017a). *Methods and measures for analyzing complex street networks and urban form* [thèse de doctorat, université de Californie, Berkeley]. ProQuest Dissertations Publishing.
- _____. (2017b). OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 126–139. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>.
- Newman, M. E. J. (2010). *Networks: An introduction* (eBook ed.). Oxford University Press.
- Barabási, A.-L. (2016). *Network science* (eBook ed.). Cambridge University Press.
- Lagesse, C. (2015). *Lire les lignes de la ville : Méthodologie de caractérisation des graphes spatiaux* [Thèse de doctorat, Université Paris Diderot – Paris VII]. HAL. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01245898>.
- Marshall, S., Gil, J., Kropf, K., Tomko, M., & Figueiredo, L. (2018). Street network studies: From networks to models and their representations. *Networks and Spatial Economics*, 18(3), 735–749. <https://doi.org/10.1007/s11067-018-9427-9>.
- Sayama, H. (2015). *Introduction to the modeling and analysis of complex systems* (eBook ed.). Open SUNY Textbooks.
- Holme, P. (2015). Modern temporal network theory: A colloquium. *European Physical Journal B*, 88(234). <https://doi.org/10.1140/epjb/e2015-60657-4>.
- Buhl, C., Gautrais, J., Solé, R. V., Kuntz, P., Valverde, S., Deneubourg, J. L., & Theraulaz, G. (2004). Efficiency and robustness in ant networks of galleries. *European Physical Journal B*, 42(1), 123–129. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2004-00364-9>.
- Barthelemy, M. (2018). *Morphogenesis of spatial networks* (eBook ed.). Springer.
- Watts, D. J., et Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 393(6684), 440–442. <https://doi.org/10.1038/30918>.
- Barabási, A.-L., & Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286(5439), 509–512. <https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509>.
- Jiang, B. (2015). A city is a complex network. In M. W. Mehaffy (Ed.), *Christopher Alexander: A city is not a tree: 50th anniversary edition* (pp. 89–100). Portland, OR: Sustasis Press.
- Jiang, B. (2016). A complex-network perspective on Alexander's wholeness. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 463, 475–484. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.07.038>.
- Jiang, B. (2007). A topological pattern of urban street networks: Universality and peculiarity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 384(2), 647–655. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.05.064>.
- Batty, M. (2004). *A new theory of space syntax* (CASA Working Papers). Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London.
- Agryzkov, T., Oliver, J. L., Tortosa, L., & Vicent, J. F. (2017). Different types of graphs to model a city (WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 118, pp. 71–82). WIT Press. <https://doi.org/10.2495/CMEM170081>

- Hamaina, R., Leduc, T., & Moreau, G. (2012). Caractérisation des tissus urbains à partir de l'analyse structurelle des réseaux viaires. *Cybergeo: European Journal of Geography*, (581). <https://doi.org/10.4000/cybergeo.25009>.
- Jiang, B., et Claramunt, C. (2004). Topological analysis of urban street networks. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 151–162. <https://doi.org/10.1068/b306>.
- Porta, S., Crucitti, P., & Latora, V. (2006). The network analysis of urban streets: A primal approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33(5), 705–725. <https://doi.org/10.1068/b32045>.
- Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E*, 73(3), 036125. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.036125>.
- Sevtsuk, A. (2018). *Analysis and planning of urban networks*. In R. Alhajj & J. Rokne (Eds.), *Encyclopedia of social network analysis and mining* (pp. 1–12). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7163-9_43-1.
- Georgiev, P. (2015). *NetworkX: Network analysis with Python* [Tutoriel]. Laboratoire d'informatique, Université de Cambridge. https://www.cl.cam.ac.uk/teaching/1415/L109/1109-tutorial_2015.pdf.
- Fleischmann, M. (2019). *momepy: Urban morphology measuring toolkit*. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1807. <https://doi.org/10.21105/joss.01807>.
- Strano, E., Viana, M. P., Cardillo, A., & Latora, V. (2013). Urban street networks: A comparative analysis of ten European cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40(6), 1071–1086. <https://doi.org/10.1068/b38216>.
- Akbarzadeh, M., Memarmontazerin, S., & Soleimani, S. (2018). Where to look for power laws in urban road networks? *Applied Network Science*, 3(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s41109-018-0060-9>.
- Rauber, A., & Krafta, R. (2018). Alexander's theories applied to urban design. *Urban Science*, 2(3), 86. <https://doi.org/10.3390/urbansci2030086>.
- Ma, D., Guo, R., Zheng, Y., Zhao, Z., He, F., & Zhu, W. (2020). Understanding Chinese urban form: The universal fractal pattern of street networks over 298 cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 192. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040192>.
- Clauset, A., Shalizi, C. R., & Newman, M. E. J. (2009). Power-law distributions in empirical data. *SIAM Review*, 51(4), 661–703. <https://doi.org/10.1137/070710111>.
- Ferrari, E., et Rae, A. (2019). *GIS for planning and the built environment: An introduction to spatial analysis* (1^e éd., e-book). Bloomsbury Academic.
- McHaffie, P., Hwang, S., & Follett, C. (2019). *GIS: An introduction to mapping technologies* (1^e éd., e-book). CRC Press / Taylor & Francis Group.

. Chapitre 8

- Batty, M. (2013). *The new science of cities* [eBook edition]. Cambridge, MA: MIT Press.
- Jiang, B. (2015). A city is a complex network. In M. W. Mehaffy (Ed.), *Christopher Alexander: A city is not a tree – 50th anniversary edition* (Chap. 6). Sustasis Press.
- Portugali, J. (2012). Complexity theories of cities: Achievements, criticism and potentials. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), *Complexity theories of cities have come of age* (pp. 47–62). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2_4.

- Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude : Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste* [Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d'Azur, Nice].
- Basili, L. L. (1998). The fractal geometry of urban organisation: Beyond the crisis of 'spontaneous order'. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 267–295). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_8.
- Mandelbrot, B. (1982). *The fractal geometry of nature*. San Francisco: W. H. Freeman.
- Dauphiné, A. (2011). *Géographie fractale : Fractals auto-similaire et auto-affine*. Paris : Hermès-Lavoisier.
- Pumain, D. (1998). Urban research and complexity. In C. S. Bertuglia, G. Bianchi, & A. Mela (Eds.), *The city and its sciences* (pp. 323–337). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95929-5_10.
- Allen, P. M. (2005). *Cities and regions as self-organizing systems: Models of complexity* (eBook ed.). Taylor & Francis e-Library.
- Batty, M., et Longley, P. (1994). *Fractal cities: A geometry of form and function* [eBook edition]. Academic Press.
- Akbar, J. A. (2021). *Crisis in the built environment: The case of the Muslim city* (2nd ed.) [E-book]. Insan Publications.
- Ben Hamouche, M. (2009). Can chaos theory explain complexity in urban fabric? Applications in traditional Muslim settlements. In K. Williams (Ed.), *Nexus network journal* (Vol. 11, No. 2). Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8976-5_6.
- Ben Hamouche, M. (2011). Fractal geometry in Muslim cities: How succession law shaped morphology. *Nexus Network Journal*, 13(2), 235–251. <https://doi.org/10.1007/s00004-011-0062-8>.
- Raymond, A. (2008). The spatial organization of the city. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The city in the Islamic world* (Vol. 1, pp. 47–70). Brill. <https://doi.org/10.1163/ej.9789004162402.i-1500.15>.
- Al-Hathloul, S. (1981). *Tradition, continuity and change in the physical environment: The Arab-Muslim city*. [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].
- Mortada, H. (2003). *Traditional Islamic principles of the built environment* [eBook edition]. Routledge.
- Bölen, F., & Kaya, H. S. (2017). Urban DNA: Morphogenetic analysis of urban pattern. *ICONARP International Journal of Architecture and Planning*, 5(1), 10–41. <https://doi.org/10.15320/ICONARP.2017.15>.
- Brunschvig, R. (1947). Urbanisme médiéval et droit musulman. *Revue des Études Islamiques*, 15, 125–155.
- Hakim, B. (2008). Law and the city. In S. K. Jayyusi, R. Holod, A. Petruccioli, & A. Raymond (Eds.), *The city in the Islamic world* (Vol. 1, pp. 71–92). Brill. <https://doi.org/10.1163/ej.9789004162402.i-1500.20>.
- Ben Hamouche, M. (2010). Urban regulation in Islamic law through an Ottoman manuscript. *Journal of Islamic Law and Culture*, 12(3), 284–307. <https://doi.org/10.1080/1528817X.2010.626173>.
- BenHamouche, M. (2003). Decision-making system and urban geometry in traditional Muslim cities: The case of Algiers 1516–1830. *Journal of Architectural and Planning Research*, 20(4), 307–322. <https://www.jstor.org/stable/43030669>.
- Stilt, K., & Saraçoğlu, M. S. (2018). Hisba and Muhtasib. In A. M. Emon & R. Ahmed (Éds.), *The Oxford handbook of Islamic law* (pp. 326–356). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199679010.013.9>.

- Alsayyad, N. (1991). *Cities and caliphs: On the genesis of Arab Muslim urbanism*. New York, NY: Greenwood Press.
- Hakim, B. S. (1986). *Arabic Islamic cities: Building and planning principles*. London: Routledge.
- Bianca, S. (2000). *Urban form in the Arab world: Past and present*. London: Thames & Hudson.
- Petrucchioli, A. (1999). The Arab city: Neither spontaneous nor created. *Environmental Design: Journal of the Islamic Environmental Design Research Centre*, 1–2, 22–33. Rome, Italy: Dell’Oca Editore.
<https://www.archnet.org/publications/3297>.
- Petrucchioli, A. (2002). New methods of reading the urban fabric of the Islamicized Mediterranean. *Built Environment*, 28(3), 202–216. <https://www.jstor.org/stable/23288452>.
- Petrucchioli, A. (2007). *After amnesia: Learning from the Islamic Mediterranean urban fabric*. Bari : ICAR.
- Akbar, J. A. (1984). *Responsibility and the traditional Muslim built environment* [Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, États-Unis].
- Holme, A. (2010). *Geometry: Our cultural heritage* [eBook edition]. Springer.
- Egash, R. (1999). *African fractals: Modern computing and indigenous design*. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press.
- Frankhauser, P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Paris : Anthropos (collection « Villes »).
- Boeing, G. (2018a). Measuring the complexity of urban form and design. *Urban Design International*, 23(4), 281–292. <https://doi.org/10.1057/s41289-018-0072-1>.
- Clauset, A., Shalizi, C. R., & Newman, M. E. J. (2009). Power-law distributions in empirical data. *SIAM Review*, 51(4), 661–703. <https://doi.org/10.1137/070710111>.
- Salingaros, N. A., Coward, L. A., West, B. J., et van Bilsen, A. (2005). *Principles of urban structure*. Amsterdam: Techne Press.
- Kalapala, V., Sanwalani, V., Clauset, A., & Moore, C. (2006). Scale invariance in road networks. *Physical Review E*, 73(2), 026130. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.026130>
- Mohajeri, N., Longley, P., & Batty, M. (2012). City shape and the fractality of street patterns. *Quaestiones Geographicae*, 31(2), 29–37. <https://doi.org/10.2478/v10117-012-0016-6>.
- Zhang, H., & Li, Z. (2012). Fractality and self-similarity in the structure of road networks. *Annals of the Association of American Geographers*, 102(2), 350–365. <https://doi.org/10.1080/00045608.2011.620505>.
- Ma, D., Guo, R., Zheng, Y., Zhao, Z., He, F., & Zhu, W. (2020). Understanding Chinese urban form: The universal fractal pattern of street networks over 298 cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 192. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040192>.
- Ravéreau, A. (1989). *La Casbah d’Alger et le site créa la ville*. Paris: Éditions Sindbad.
- Playfair, R. L. (1890). *Handbook for travellers in Algeria and Tunis*. London : John Murray.
- Shuval, T. (1998). *La ville d’Alger vers la fin du XVIIIe siècle : Population et cadre urbain*. Paris : CNRS Éditions.
- Pasquali, E. (1955). L’évolution de la rue musulmane d’El-Djezaïr. *Documents algériens, Série culturelle*, 75. Alger : Société nationale des Entreprises de Presse.

- El-Habib Tahari, B., et Kassab, T. (2019). Relief morphology and urban hydrography as historic sources: Algiers in the beginning of the Ottoman period. *International Journal of Historical Archaeology*, 23(1), 57–80. <https://doi.org/10.1007/s10761-018-0459-0>.
- Cresti, F. (2005). La population d'Alger et son évolution durant l'époque ottomane : Un état des connaissances controversé. *Arabica*, 52(4), 457–495. <https://doi.org/10.1163/157005805774320240>.
- Missoum, S. (2014). Andalusi immigration and urban development in Algiers (sixteenth and seventeenth centuries). In *The expulsion of the Moriscos from Spain: A Mediterranean diaspora* (pp. 329–356). Brill. https://doi.org/10.1163/9789004279353_015.
- Ben Hamouche, M. (1993). *Gestion urbaine de Dar Es-Soltane (Grand Alger 1516-1830) : Essai de ressourcement* [Thèse de doctorat, Université Paris 8].
- Raymond, A. (1985). *Grandes villes arabes à l'époque ottomane*. Paris : Sindbad. (Collection Bibliothèque arabe)
- Piesse, L., et Canal, J. (1889). *Tlemcen, les villes de l'Algérie*. Paris : Librairie Africaine et Coloniale.
- Oulebsir, N. (2004). *Les usages du patrimoine : Monuments, musées et politique coloniale en Algérie, 1830-1930*. Paris : Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme.
- Boukerche, D. (1989). *Évolution de la ville de Tlemcen pendant la période coloniale* [Mémoire de magister, École Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (EPAU), Alger].
- Kassab Baba Ahmed, T. (2007). *Antagonisme entre espaces historiques et développement urbain : Le cas de Tlemcen* [Thèse de doctorat, École Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (EPAU), Alger].
- Ravéreau, A. (1981). *Le M'Zab, une leçon d'architecture*. Paris: Sindbad.
- Benkari, N. (2014). *L'architecture des mosquées ibadites au M'Zab, à Djerba et en Oman: Lecture des principes de conception et de construction*. Saarbrücken: Verlag- Presses Académiques Francophones.
- Masqueray, E. (1878). Les Chéroniques du M'Zab. *Bulletin de la Société de Géographie*, 15(2), 129-160. Paris.
- Mercier, M. (1922). *La civilisation urbaine au M'Zab: Étude de sociologie africaine*. Alger: Jules Carbonel.
- Al-Farastā'ī al-Nafūsī, Abū al-‘Abbās Aḥmad ibn Muḥammad ibn Bakr. (1997). *al-Qisma wa-uṣūl al-arḍīn* (2^e éd.). Ghardaïa: Jam‘iyyat al-Turāth.
- Donnadieu, C., Donnadieu, P., Didillon, H., & Didillon, J.-M. (1977). *Habiter le désert: Les maisons mozabites. Recherches sur un type d'architecture traditionnelle transmis par la tradition orale saharienne*. Bruxelles: Pierre Mardaga. (Collection Architecture).
- Benyoucef, B. (2010). *Le M'Zab: Parcours millénaire*. Alger: Éditions Alpha.
- Bencherif, M. (2007). *La micro-urbanisation et la ville-oasis, une alternative à l'équilibre des zones arides pour une ville saharienne durable: Cas du Bas-Sahara* [Thèse de doctorat, Université de Constantine].
- Capot-Rey, R. (1953). *Le Sahara français*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Côte, M. (1993). *L'Algérie, ou l'espace retourné*. Paris: Flammarion.
- Echallier, J.-C. (1968). *Essai sur l'habitat sédentaire traditionnel au Sahara algérien* [Thèse de doctorat, Institut d'Urbanisme, Université de Paris].
- Godard, Cdt. (1954). *L'oasis moderne: Essai d'urbanisme saharien*. Alger: La Maison du Livre.

- Fall, A., Fortin, M.-J., Manseau, M., & O'Brien, D. (2007). Spatial graphs: Principles and applications for habitat connectivity. *Ecosystems*, 10(3), 448–461. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9038-7>.
- Boeing, G. (2018b). Planarity and street network representation in urban form analysis. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 47(5), 855–869. <https://doi.org/10.1177/2399808318802941>.
- Agryzkov, T., Oliver, J. L., Tortosa, L., & Vicent, J. F. (2017). *Different types of graphs to model a city* (WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 118, pp. 71–82). WIT Press. <https://doi.org/10.2495/CMEM170081>.
- Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E*, 73(3), 036125. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.036125>.
- Porta, S., Crucitti, P., & Latora, V. (2006). The network analysis of urban streets: A primal approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33(5), 705–725. <https://doi.org/10.1068/b32045>.
- Buhl, J., Gautrais, J., Reeves, N., Solé, R. V., Valverde, S., Kuntz, P., & Theraulaz, G. (2006). Topological patterns in street networks of self-organized urban settlements. *European Physical Journal B*, 49(4), 513–522. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2006-00085-1>.
- Sharifi, A. (2019). Resilient urban forms: A review of literature on streets and street networks. *Building and Environment*, 147, 171–187. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.040>.
- Añez, J., De La Barra, T., & Pérez, B. (1996). Dual graph representation of transport networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 30(3), 209–216. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(95\)00024-0](https://doi.org/10.1016/0191-2615(95)00024-0).
- Hillier, B. (1999). The hidden geometry of deformed grids: Or, why space syntax works, when it looks as though it shouldn't. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 26(2), 169–191. <https://doi.org/10.1068/b4125>.
- Jiang, B., & Claramunt, C. (2004). Topological analysis of urban street networks. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 151–162. <https://doi.org/10.1068/b306>.
- Mrvar, A., & Batagelj, V. (2016). Analysis and visualization of large networks with program package Pajek. *Complex Adaptive Systems Modeling*, 4(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s40294-016-0017-8>.
- Virkar, Y., & Clauset, A. (2014). Power-law distributions in binned empirical data. *Annals of Applied Statistics*, 8(1), 89–119. <https://doi.org/10.1214/13-AOAS710>.

. Chapitre 9

- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour* [eBook]. Oxford University Press.
- Liu, Y. (2009). *Modelling urban development with geographical information systems and cellular automata*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Ilachinski, A. (2001). *Cellular automata: A discrete universe*. Singapore: World Scientific Publishing.
- Sayama, H. (2015). *Introduction to the modeling and analysis of complex systems* [e-book]. Open SUNY Textbooks. Milne Library, State University of New York at Geneseo.
- White, R., Engelen, G., et Uljee, I. (2015). *Modeling cities and regions as complex systems: From theory to planning applications* [e-book]. The MIT Press.
- Tong, X., et Feng, Y. (2020). A review of assessment methods for cellular automata models of land-use change and urban growth. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(5), 866–898. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658816.2019.1684499>.

- Tobler, W. R. (1979). Cellular geography. In S. Gale & G. Olsson (Eds.), *Philosophy in geography* (pp. 379–386). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-9394-5_18.
- Couclelis, H. (1985). Cellular worlds: A framework for modeling micro–macro dynamics. *Environment and Planning A*, 17(5), 585–596. <https://doi.org/10.1068/a170585>.
- White, R., & Engelen, G. (1993). Cellular automata and fractal urban form: A cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 25(8), 1175–1199. <https://doi.org/10.1068/a251175>.
- White, R., Engelen, G., et Uljee, I. (1997). The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(3), 323–343. <https://doi.org/10.1068/b240323>.
- Batty, M., & Xie, Y. (1994). From cells to cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21(S1), S31–S48. <https://doi.org/10.1068/b21S031>.
- Batty, M., & Xie, Y. (1997). Possible urban automata. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 175–192. <https://doi.org/10.1068/b240175>.
- Clarke, K. C., Hoppen, S., et Gaydos, L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 247–261. <https://doi.org/10.1068/b240247>.
- Clarke, K. C., & Gaydos, L. J. (1998). Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7), 699–714. <https://doi.org/10.1080/136588198241617>.
- White, R., & Engelen, G. (1994). Urban systems dynamics and cellular automata: Fractal structures between order and chaos. *Chaos, Solitons & Fractals*, 4(4), 563–583. [https://doi.org/10.1016/0960-0779\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0960-0779(94)90066-3).
- Batty, M. (2005). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.
- O’Sullivan, D. B. (2000). *Graph-based cellular automaton models of urban spatial processes* [Thèse de doctorat, University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis].
- Moreno Sierra, D. L. (2009). *Une approche réseau pour l'intégration de la morphologie urbaine dans la modélisation spatiale individu-centrée* [Thèse de doctorat en géographie et aménagement, Université de Pau et des Pays de l’Adour].
- Wang, H., Liu, X., Zhao, C., Chang, Y., Liu, Y., & Zang, F. (2021). Spatial-temporal pattern analysis of landscape ecological risk assessment based on land use/land cover change in Baishuijiang National Nature Reserve in Gansu Province, China. *Ecological Indicators*, 124, 107454. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107454>.
- Garcia-Alvarez, D., Camacho Olmedo, M. T., Mas, J. F., et Paegelow, M. (2022). Land use cover mapping, modelling and validation: A background. In M. T. Camacho Olmedo, J. F. Mas, M. Paegelow, & D. Garcia-Álvarez (Eds.), *Land use cover datasets and validation tools: Validation practices with QGIS* (pp. 21–33). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90998-7>.
- Xu, Q., Zhu, A. X., & Liu, J. (2023). Land-use change modeling with cellular automata using land natural evolution unit. *Catena*, 224, 106998. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106998>.

- Clarke, K. C. (2008). Mapping and modelling land use change: An application of the SLEUTH model. In *Landscape Analysis and Visualization: Spatial Models for Natural Resource Management and Planning* (pp. 353–366). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69168-6_17.
- Chaudhuri, G., & Clarke, K. C. (2013). The SLEUTH land use change model: A review. *Environmental Resources Research*, 1(1), 88–105. <https://doi.org/10.22069/ijerr.2013.1688>.
- Ghalehtemouri, K. J., Shamsoddini, A., Mousavi, M. N., Ros, F. B. C., & Khedmatzadeh, A. (2022). Predicting spatial and decadal land use and land cover change using integrated cellular automata Markov chain model-based scenarios (2019–2049) in Zarrin-Rūd River Basin, Iran. *Environmental Challenges*, 6, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100399>.
- Azabdaftari, A., et Sunar, F. (2024). Predicting urban tomorrow: CA-Markov modeling and district evolution. *Earth Science Informatics*, 17(4), 3215–3232. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01340-4>.
- Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Ou, J., Chen, Y., & Pei, F. (2017). A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 168, 94–116. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.019>.
- Wang, J., Lv, J., Zhang, W., Chen, T., Yang, Y., & Wu, J. (2022). Land-use pattern evaluation using GeoSOS-FLUS in national territory spatial planning: A case study of Changzhi City, Shanxi Province. *Sustainability*, 14(21), 13752. <https://doi.org/10.3390/su142113752>.
- Abbas, Z., Yang, G., Zhong, Y., & Zhao, Y. (2021). Spatiotemporal change analysis and future scenario of LULC using the CA-ANN approach: A case study of the Greater Bay Area, China. *Land*, 10(6), 584. <https://doi.org/10.3390/land10060584>.
- Muhammad, R., Zhang, W., Abbas, Z., Guo, F., et Gwiazdzinski, L. (2022). Spatiotemporal change analysis and prediction of future land use and land cover changes using QGIS MOLUSCE plugin and remote sensing big data: A case study of Linyi, China. *Land*, 11(3), 419. <https://doi.org/10.3390/land11030419>.
- Chettry, V., et Surawar, M. (2021). Delineating urban growth boundary using remote sensing, ANN-MLP and CA model: A case study of Thiruvananthapuram urban agglomeration, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(10), 2437–2450. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01401-x>.
- Alshari, E. A., & Gawali, B. W. (2022). Modeling land use change in Sana'a City of Yemen with MOLUSCE. *Journal of Sensors*, 2022(1), 7419031. <https://doi.org/10.1155/2022/7419031>.
- Baghel, S., Kothari, M. K., Tripathi, M. P., Singh, P. K., Bhakar, S. R., Dave, V., & Jain, S. K. (2024). Spatiotemporal LULC change detection and future prediction for the Mand catchment using MOLUSCE tool. *Environmental Earth Sciences*, 83(2), 66. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11381-5>.
- Ben Hamouche, M. (1993). *Gestion urbaine de Dar Es-Soltane (Grand Alger 1516-1830) : Essai de ressourcement* [Thèse de doctorat, Université Paris 8].
- Athmania, D., & Achour, H. (2014). External validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI-SRTM v4.1 free access digital elevation models (DEMs) in Tunisia and Algeria. *Remote Sensing*, 6(5), 4600–4620. <https://doi.org/10.3390/rs6054600>.
- Chergui, S., et Haddad, D. (2020). Les abords de la citadelle d'Alger au XIX^e siècle. In J. Navarro Palazón & L. J. García-Pulido (Eds.), *FORTMED 2020 – Defensive Architecture of the Mediterranean* (Vol. 11, pp. 577–584). Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/FORTMED2020.2020.11666>.
- El Kechebour, B. (2015). Relation between stability of slope and the urban density: Case study. *Procedia Engineering*, 114, 824–831. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.034>.

- Raymond, A. (1985). *Grandes villes arabes à l'époque ottomane*. Paris : Sindbad. (Collection Bibliothèque arabe).
- Petrucchioli, A. (1999). The Arab city: Neither spontaneous nor created. *Environmental Design: Journal of the Islamic Environmental Design Research Centre*, 1–2, 22–33. Rome, Italy: Dell'Oca Editore.
<https://www.archnet.org/publications/3297>.
- Jain, M. (2024). Future land use and land cover simulations with cellular automata-based artificial neural network: A case study over Delhi megacity (India). *Heliyon*, 10(14), e34662.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34662>.
- Gao, C., Cheng, D., Iqbal, J., & Yao, S. (2023). Spatiotemporal change analysis and prediction of the Great Yellow River Region (GYRR) land cover and the relationship analysis with mountain hazards. *Land*, 12(2), 340.
<https://doi.org/10.3390/land12020340>.
- Ugur, Y. (2018). Mapping Ottoman cities: Socio-spatial definitions and groupings (1450-1700). *Journal for Early Modern Cultural Studies*, 18(3), 16-65. <https://doi.org/10.1353/jem.2018.0023>.
- Akbar, J. A. (2021). *Crisis in the built environment: The case of the Muslim city* (2nd ed.) [E-book]. Insan Publications.
- Mortada, H. (2003). *Traditional Islamic principles of the built environment* [eBook edition]. Routledge.
- Yeh, A. G. O., & Li, X. (2002). Urban simulation using neural networks and cellular automata for land use planning. In *Advances in Spatial Data Handling: 10th International Symposium on Spatial Data Handling* (pp. 451–464). Berlin : Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56094-1_33.
- Almeida, C. M., Gleriani, J. M., Castejon, E. F., & Soares-Filho, B. S. (2008). Using neural networks and cellular automata for modelling intra-urban land-use dynamics. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(9), 943–963. <https://doi.org/10.1080/13658810701731168>.
- Zhang, J., & Goodchild, M. F. (2002). *Uncertainty in geographical information*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Hu, Z., et Lo, C. P. (2007). Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31(6), 667–688. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2006.11.001>.
- Lin, Y. P., Chu, H. J., Wu, C. F., & Verburg, P. H. (2011). Predictive ability of logistic regression, auto-logistic regression and neural network models in empirical land-use change modeling: A case study. *International Journal of Geographical Information Science*, 25(1), 65–87. <https://doi.org/10.1080/13658811003752332>.