



HAL
open science

Ville, complexité, incertitude. Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste.

Giovanni Fusco

► **To cite this version:**

Giovanni Fusco. Ville, complexité, incertitude. Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste.. Géographie. Université Côte d'Azur, 2018. tel-01968002

HAL Id: tel-01968002

<https://hal.science/tel-01968002>

Submitted on 1 Jan 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches - Volume 2
Discipline : Géographie
Université de Nice Sophia Antipolis, UMR 7300 ESPACE

Ville, complexité, incertitude

Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste

Giovanni Fusco
Chargé de Recherche CNRS

Présenté et soutenu le 5 février 2018 devant le jury composé de :

Dominique Badariotti, Professeur, Université Louis Pasteur Strasbourg, UMR Live

Arnaud Banos, Directeur de Recherche CNRS, UMR Géographie-cités, Paris

Valerio Cutini, Professeur, Università degli Studi di Pisa, DESTEC

Ricardo González Villaescusa, Professeur, Université Nice Sophia Antipolis, UMR CEPAM

Didier Josselin, Directeur de Recherche CNRS, UMR ESPACE, Avignon

Andrea Tettamanzi, Professeur, Université Nice Sophia Antipolis, UMR I3S

Christine Voiron-Canicio, Professeur, Université Nice Sophia Antipolis, UMR ESPACE



Table des matières

INTRODUCTION	5
Un parcours personnel entre villes et disciplines	5
Présentation et contexte de l'essai	7
Six idées maitresses	9
Contenu et structuration de l'ouvrage.	12
1. PARADIGMES INTERPRETATIFS POUR LA VILLE ET SES TRANSFORMATIONS METROPOLITAINES	14
1.1 Les mutations des espaces urbains et des attentes de connaissance	14
La ville change	14
La façon de l'appréhender aussi	15
1.2 Quel cadre épistémique pour la recherche dans ce domaine ?	16
La connaissance sur la ville n'est plus possible en termes de théories « fortes »	16
D'ailleurs, qu'est-ce que la connaissance ?	16
Nous aurons toujours besoin de théories, de théories pour les sciences humaines et sociales	18
1.3 Repositionner ces questionnements scientifiques dans le paradigme de la complexité	19
L'inéluctabilité d'une vision « complexe »	19
La pensée complexe de Morin	20
... et la complexité restreinte du mainstream	21
Quelle complexité pour la géographie ?	22
1.4 L'incertitude de la connaissance des systèmes complexes socio-spatiaux	25
La certitude de l'incertitude	25
De l'incertitude de l'information géographique ...	26
... à l'incertitude de la connaissance géographique	26
L'incertitude de la connaissance d'un système géographique complexe	27
Concepts, explications, interprétations : l'incertitude est dans la complexité du système	29
Une connaissance sans incertitudes est fragile	32
Faut-il pour autant une connaissance sans théorie ?	32
2. LA COMPLEXITE DES VILLES ET DES AIRES METROPOLITAINES POUR LE GEOGRAPHE ET L'URBANISTE	36
2.1 La ville non complexe	36
La ville, un système qui peut être contrôlé en se focalisant sur ses fonctions	36
Les formes physiques sont codifiées par des visions idéologiques sur la ville	37

2.2 La complexité urbaine	39
Des nouvelles approches, plus holistiques et attentives aux questions de forme	39
La maturation de théories computationnelles pour la complexité urbaine	43
2.3 Le problème des concepts et des points de vue pour appréhender la ville	47
Des concepts polysémiques et polymorphes pour la ville complexe	47
Des concepts pour la ville et ses mutations, en lien avec le contexte géographique de leur formulation	48
... et quelques implications pour la connaissance urbaine	51
2.4 Les hiérarchies sont fondamentales, mais elles ne sont pas tout : le cas des aires métropolitaines	52
Les hiérarchies sont une caractéristique fondamentale des systèmes complexes organisés	52
Les hiérarchies des système cristallériens doivent être remises en question	54
L'organisation des espaces urbains en contexte métropolitain ne se réduit pas à une hiérarchie	56
La convergence avec l'analyse des réseaux complexes	63
Ce ne sont pas les hexagones qui posent problème, mais les arbres	67
Les centralités métropolitaines varient selon le point de vue que l'on privilégie	68
3. FORME ET ORGANISATION SPATIALE DE LA VILLE COMPLEXE	72
3.1 La spatialité interne de la ville	72
Géographes et urbanistes ont une légitimité à aborder la complexité de la ville par sa spatialité	72
La spatialité de la ville est à la fois organisation spatiale socio-fonctionnelle et forme urbaine	73
La forme abstraite de la science de la complexité s'éloigne de la phénoménologie de la forme urbaine	73
La forme urbaine, facteur de dynamique et source pour des programmes de maintien ou changement	74
3.2 Les registres de la forme urbaine	76
La forme urbaine est un concept polymorphe et polysémique, témoignant de sa complexité	76
Ce riche polymorphisme permet de saisir les directions prises par mes recherches sur la forme urbaine	78
3.2 Renouveler l'approche de la forme des tissus	79
La morphologie urbaine voit la forme urbaine complexe mais rechigne aux approches computationnelles	79
Le protocole MFA, ma contribution au renouvellement des recherches sur la forme des tissus par l'analyse spatiale computationnelle	82
Première application du MFA : tissus et régions morphologiques de l'aire métropolitaine azurée	86
3.4 De la forme des tissus à la configuration	92
La configuration, nouvelle approche à la forme urbaine en lien avec l'analyse des réseaux complexes	92
L'approche configurationnelle informe une grande richesse de protocoles d'analyse	95
La configuration montre que la distance en soi n'est pas le principe fondateur de l'organisation urbaine	99
3.5 Formes, configurations, fractalité : convergence de regards sur la complexité de la spatialité urbaine	102
La fractalité statistique de la loi de puissance, signature de la complexité auto-organisée de la ville	102
Dépourvus de taille typique, les phénomènes en loi de puissance posent des enjeux de connaissance incertaine	104
L'incertitude porte également sur les processus derrière les lois de puissance	105
Au-delà de la loi de puissance, l'émergence d'une forme urbaine selon Bill Hillier	106
Nikos Salingaros renouvelle l'analyse de la forme urbaine par l'approche de la complexité	109

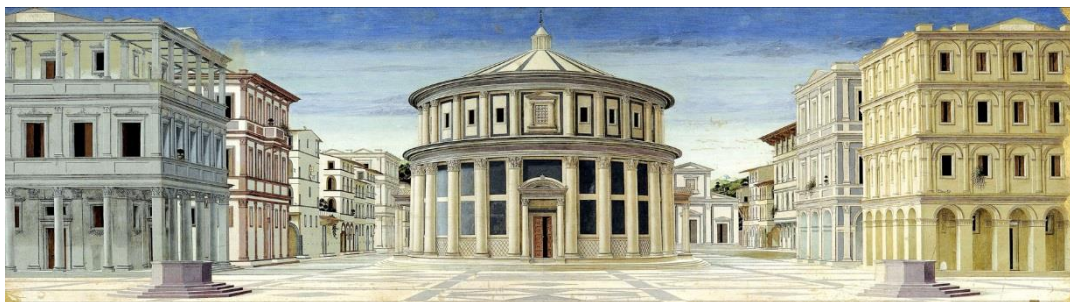
3.6 Les multiples relations entre formes et fonctionnements pour la ville	114
Organisation socioéconomique et organisation spatiale de la ville	114
Dans la ville, l'articulation essentielle est celle entre production-échange et habiter	116
Dépasser l'aporie de la spatialisation de phénomènes a-spatiaux	117
Une vision d'ensemble : caractéristiques des lieux et construction sociale de la ville	118
3.7 Les relations forme-fonctionnement en contexte métropolitain à l'épreuve des faits	122
Trois recherches empiriques sur la relation forme-fonctionnement	122
Les profils sociogéographiques, croisement de trajectoires résidentielles, motivations et modes d'habiter	123
Des profils sociogéographiques très semblables en Provence et sur la Côte d'Azur	124
Les morphologies métropolitaines et les modes d'habiter entretiennent des relations multiples	129
L'affordance spatiale pour appréhender la spatialité du cadre de vie métropolitain	131
La relation complexe entre affordance spatiale et régimes d'habiter	132
Le commerce, un domaine privilégié pour l'analyse forme/fonctionnement	139
Un modèle bayésien pour lier les densités commerciales aux propriétés configurationnelles	140
Convergence de registres de la forme et pluralité de modèles urbains pour l'analyse du commerce	143
4. METHODOLOGIES DE LA CONNAISSANCE INCERTAINE SUR LA VILLE	148
4.1 La certitude de l'incertitude dans l'étude de la complexité urbaine	148
Quel rôle donner aux probabilités dans l'appréhension d'un système complexe ?	148
4.2 L'apport des probabilités bayésiennes	149
L'approche bayésienne ouvre des nouvelles perspectives à l'emploi des probabilités	149
Le raisonnement bayésien	150
Le raisonnement bayésien au secours du « small data »	151
Incertitudes, pluralité de modèles et small data pour les effets des politiques de densification urbaine	152
Le cas d'étude de Grenoble dans le raisonnement bayésien	155
4.3 Connaissance experte et apprentissage dans les bases de données : les réseaux bayésiens	157
Les probabilités bayésiennes tirent profit de l'information des grandes bases de données	157
Les réseaux bayésiens peuvent modéliser des systèmes de causalité probabilisée	157
Les réseaux bayésiens peuvent accompagner différents types de raisonnement	159
15 ans de recherche dans l'exploitation des réseaux bayésiens pour la connaissance urbaine	161
4.4 Adapter les réseaux bayésiens aux besoins des connaissances incertaines sur la ville	161
Intégrer l'espace et le temps dans la modélisation par les réseaux bayésiens	161
Identifier des « types » et des relations forme-fonctionnement en contexte d'incertitude	164
Application n°1 : recherche de relations causales incertaines – De l'explication d'une variable cible à l'identification d'un système de relations	164
Application n°2 : la recherche inductive de patterns par le clustering multivarié bayésien	168
Le clustering bayésien est probabiliste et identifie des groupes partageant des caractéristiques communes	169
4.5 Au de-là des probabilités bayésiennes : le dialogue avec l'intelligence artificielle.	181
Notre état de connaissances ne justifie pas toujours le recours à une modélisation bayésienne	181
Incertitude, imprécision, incomplétude et incohérence selon l'Intelligence Artificielle	182
Vers des théories plus générales que la logique classique et les probabilités	183
Des cadres théoriques plus expressifs : probabilités imprécises, évidences, possibilités	185

Versions quantitative et qualitative de la théorie des possibilités	187
La théorie des possibilités a des liens mais ne coïncide pas avec la théorie des ensembles flous	188
4.6 Au-delà des probabilités bayésiennes : retours d'expérience sur la ville	190
Des ontologies incertaines pour la ville	190
Modélisations probabiliste et possibiliste de la polarisation résidentielle provençale	191
4.7 Une vision d'ensemble : niveaux d'incertitude et complexité	196
Les cinq niveaux de l'incertitude	196
Le lien entre niveaux d'incertitude, complexité et modélisations possibles	196
L'incertitude profonde oblige à une grande modestie épistémique et à des approches plus qualitatives	198
Intégrer l'incertitude dans les recherches sur la forme urbaine	199
5. POUR UNE GEOPROSPECTIVE DE LA VILLE RESILIENTE ET ANTIFRAGILE	203
5.1 La géoprospective urbaine : prévoir n'est pas possible, prospecter est nécessaire	203
L'aménagement et l'urbanisme à la recherche de nouveaux paradigmes opérationnels	203
La non connaissabilité dans le contexte de l'aménagement et de l'urbanisme	204
Une position extrême : face à la complexité, abandonner la téléocratie, poursuivre la nomocratie	205
La gouvernance des interventions, le rôle des modèles, les enjeux de la connaissance urbaine	207
La géoprospective urbaine pour explorer les devenir possibles de la ville complexe	208
Mes recherches en modélisation géoprospective et l'horizon d'une géoprospective urbaine	211
5.2 La forme urbaine, pivot de la ville résiliente et antifragile	214
Lorsque l'approche de la forme urbaine se fait normative, tension entre innovation et tradition	214
Résilience et antifragilité	216
Résilience et antifragilité morphologiques pour la ville	218
Quel urbanisme pour la ville résiliente et antifragile ?	222
Ébauche de géoprospective urbaine de long terme par via negativa et enjeux de connaissance	225
Connaissance, conscience et résilience urbaine	229
5.3 Un agenda de recherches morpho-dynamiques, morpho-prospectives et morpho-culturelles pour la ville	231
La recherche morpho-dynamique	232
La recherche morpho-prospective	235
La recherche morpho-culturelle	237
BIBLIOGRAPHIE	245

Introduction

Un parcours personnel entre villes et disciplines

Lorsque, à l'âge de huit ans, j'ai quitté un petit village-rue du bas Latium pour m'installer, avec ma famille, à Urbino, dans les Marches italiennes, je ne savais pas à quel point allait changer le cadre physique de ma vie au quotidien. C'est qu'Urbino, tout en étant une petite ville de quinze milles habitants, est, avant tout, une ville. Une ville qui organise une vie urbaine, où la place est le centre de la vie sociale, culturelle et politique de la cité et où des quartiers différents se reconnaissent dans ce centre commun. La place et le cours qu'y amène sont aussi les lieux où flânent les jeunes de la ville et où les locaux se mélangent avec les étudiants de l'université. Mais Urbino est aussi une ville qui, dans son histoire, avait fait l'objet d'une des premières tentatives de transformation consciente de la ville issue du moyen-âge, avec ses ruelles tortueuses, ses places et ses placettes. Nous sommes au début de la renaissance italienne. Au milieu du XV^e siècle, à la cour du duc Federico da Montefeltro, Luciano Laurana, Francesco di Giorgio Martini, Piero della Francesca, Baldassarre Castiglioni et Giovanni Santi (le père du grand Raphaël), sous l'influence, entre autres, de Leon Battista Alberti, concevaient le projet utopique d'une ville idéale et réalisaient, autours du palais ducal et des espaces publics qu'en sont l'interface avec le reste de la ville, une transformation radicale de la ville réelle vers la ville idéale (Benevolo et Boninsegna 1986).



La ville idéale (Urbino, Galerie Nationale des Marches, attribution incertaine L. Laurana, Francesco di Giorgio).

Mais le garçonnet que j'étais ne connaissait pas la portée de cette expérience historique. J'habitais cette ville et je donnais pour acquise sa manière d'être et de fonctionner. Par ailleurs, les périphéries d'Urbino avaient également fait l'objet de plans d'aménagements par l'architecte Giancarlo De Carlo dès les années 60 (De Carlo 1966). Me parents s'étaient ainsi établis dans le quartier de la Pineta, conçu de toute pièce par De Carlo dans les années 70, dans des formes brutalistes fort différentes de la ville ancienne. Encore une fois, j'en faisais l'expérience. Je m'étais habitué à des bâtiments avec des toits-rues, où des tourelles constituent les entrées des cages d'escaliers, mais j'appréciais surtout les bâtiments sur pilotis car on y pouvait jouer au ballon même par temps de pluie ou de neige.

Ensuite vint Milan, la grande ville de mes études universitaires, avec ses lignes de métros, ses *navigli*, ses centres directionnels et ses quartiers industriels. Au Politecnico, j'étudiais l'aménagement et je cherchais les solutions aux problèmes sociaux et environnementaux posées par la grande ville contemporaine. Mais à la faculté des sciences de l'ingénieur, celle du prix Nobel pour la chimie Giulio Natta, je me formais en tant que jeune technicien, confiant dans les solutions apportées par la

technologie et la maîtrise rationnelle des forces de la nature. La métropole milanaise était à la démesure de l'expérience individuelle, même si mon engagement social m'avait amené à la parcourir en long et en large, de la frontière suisse, aux faubourgs industriels de la Brianza, jusqu'à la campagne de la plaine du Pô. Une année d'études en Allemagne, à Aix-la-Chapelle, était un jumelage avec une autre école d'ingénieur, la RWTH, née comme le Politecnico de la même volonté des élites urbaines de la fin du XIX^e de trouver des solutions pratiques à la production industrielle et à l'organisation sociale.

Jeune ingénieur, une mission d'étude pour la Fondation ENI Enrico Mattei me donna la possibilité de suivre un cursus de préparation à la recherche en géographie à Nice. Cela fut un amour à première vue avec la géographie théorique et quantitative française et avec l'admirable réseau d'établissements qui participaient à la formation des jeunes impétrants (Nice, Aix-Marseille, Avignon, Montpellier, Grenoble, Besançon et Dijon). Dans la lancée, une bourse de thèse financée par l'ADEME, me permit d'entamer une carrière dans la recherche scientifique, avec un horizon de réflexion plus vaste et problématisé. Je m'engageai dans un double parcours de doctorat, en aménagement urbain au Politecnico de Milan et en géographie à l'Université de Nice Sophia Antipolis. Je découvris deux autres villes, sur les bords de la Méditerranée : Nice et Gênes, avec leurs arrière-pays montagneux, leurs logistiques (touristique pour l'une, portuaire pour l'autre) et leurs conurbations littorales. Les recherches ciblant ces deux villes essayaient de mettre en relation les systèmes de mobilité urbaine, quelques grands paramètres urbanistiques (densité, mixité, centralisation, fragmentation, etc.) et les impacts environnementaux et socioéconomiques des transports. Elles s'ouvraient déjà à la systémique, à l'analyse multivariée d'indicateurs, à la modélisation probabiliste et au raccord entre recherche géographique et aide à la décision en aménagement. Mais la ville était encore pour moi une grande machine, dont il fallait optimiser la performance, ici environnementale et socioéconomique. Cependant, les prémisses d'une conceptualisation plus large étaient jetées, grâce à mes discussions avec Giovanni Rabino et André Dauphiné sur la complexité des systèmes géographiques, et à mes premières lectures dans le domaine de l'intelligence artificielle.

Je devins d'abord maître de conférences et ensuite chargé de recherche CNRS au laboratoire ESPACE. Avec les collègues niçois, avignonnais et aixois, je m'intéressais davantage aux multiples facettes de la métropolisation des territoires et des enjeux qu'y sont liés (transformation des modes de vie, ségrégation sociospatiale, satellisation des hinterlands, etc.), notamment en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Entretemps, les villes de Nice, de Gênes et de Marseille me dévoilaient leurs secrets morphologiques. La lecture de Gianfranco Caniggia et Gianluigi Maffei me permit de comprendre la forme urbaine surprenante de la ville de Gênes. Celle de Philippe Graff me donna les clés de lecture de l'urbanisme niçois, le reliant directement au modèle turinois et, de manière plus indirecte, aux mêmes expériences d'urbanisme prémoderne qui avaient façonné Urbino. Marcel Roncayolo me guidait dans la lecture de Marseille. Ma vie familiale et un soutien du gouvernement canadien me permirent également de faire l'expérience et d'étudier attentivement les contextes urbains nord-américains, Toronto, Montréal, Kitchener-Waterloo et, ensuite, New York et Boston. J'eus l'occasion de comprendre par expérience directe le sens des analyses de Jane Jacobs et Kevin Lynch.

À Nice, se formait progressivement un groupe de collègues attentifs au devenir des territoires. Sous l'impulsion de Christine Voiron-Canicio, naissait la géoprospective territoriale. Dans un dialogue fructueux avec les collègues archéologues, épistémologues, sociologues, historiens, anthropologues et économistes de l'MSHS Sud-Est se constituait également un groupe de réflexion sur la connaissance incertaine en SHS et je pris l'initiative de catalyser un groupe de travail sur la connaissance géographique incertaine au sein d'ESPACE. Grâce à un projet PEPS financé par le CNRS, la collaboration interdisciplinaire fut approfondie avec les sciences informatique et, plus particulièrement avec

l'intelligence artificielle des laboratoires IRIT (Toulouse) et I3S (Sophia Antipolis). J'ai eu le privilège de dialoguer, de me confronter et, en passant, d'apprendre beaucoup de choses, avec les pères fondateurs de la théorie des possibilités, Didier Dubois et Henri Prade.

Parallèlement, se renforçait mon engagement de recherche sur la morphologie urbaine et sur les relations multiples entre formes et fonctionnements de la ville. Des recherches académiques (projets PREDIT et ANR) et des recherches finalisées pour le compte d'acteurs territoriaux (services de l'État, collectivités locales, chambres consulaires) me permirent d'avancer dans la formulation de nouvelles approches méthodologiques et dans la réalisation d'études empiriques. L'horizon des collaborations internationales allait également s'élargir, vers l'Allemagne et l'Italie d'abord, mais aussi le Brésil, les Etats-Unis, le Japon et la Turquie. Je lisais Hillier, Batty, Alexander et, surtout, Salingaros.

Bien évidemment, cette esquisse rapide oublie les impasses, les difficultés, les hésitations, les contradictions de tout parcours intellectuel inséré dans un contexte sociétal où la nécessaire quête de fonds pour le financement de la recherche nous oblige fréquemment à des compromis entre le programme de recherche que l'on se donne et les possibilités de la recherche réelle. Il s'agit probablement d'une tension comparable à celle entre la ville idéale et la ville réelle des interventions de l'urbaniste.

Mais, en dépit de tout, au bout d'une douzaine d'années de parcours académique, tous les ingrédients étaient réunis pour systématiser mes réflexions sur la ville, sur sa complexité et sur l'incertitude qui caractérise sa connaissance. C'est cette réflexion que je vous livre dans ce texte, au sein duquel je m'efforcerai toujours d'identifier les points que je donne pour acquis, les possibles relations entre eux permettant d'obtenir une vision plus ample, et ce qui reste à faire ou à élucider.

Présentation et contexte de l'essai

« Ville, Complexité, Incertitude » n'est pas un essai exhaustif sur la ville complexe ni, de façon plus ciblée, sur la complexité de l'organisation spatiale des villes à l'heure de la métropolisation.

Au contraire, je ne pourrai que revisiter de façon partielle des recherches sur l'organisation spatiale des villes contemporaines ayant comme **objectif de montrer comment les approches de la complexité et de la connaissance incertaine peuvent venir féconder la recherche en géographie urbaine et en aménagement des espaces urbains en privilégiant une entrée par les questions d'organisation spatiale, en général, et de forme, en particulier.** Par ce biais, j'essaierai également d'apporter une contribution à d'important enjeux sociétaux dans la compréhension de l'organisation spatiale de nos villes et dans l'intervention consciente sur elles (voir ci-dessous). Mon essai est donc animé par une dialectique entre un domaine géographique clairement délimité (l'organisation spatiale urbaine et métropolitaine) et un questionnement scientifique plus général, qui trouve dans ce domaine un banc d'essai concret : comment intégrer complexité et incertitude dans l'analyse des formes urbaines et dans les suggestions pour l'aménagement de la ville.

La démarche de recherche dans laquelle je me situe est celle de la **géographie théorique et quantitative**, de l'analyse spatiale et de la modélisation des espaces urbains, à laquelle je souhaite apporter une contribution personnelle par le renouvellement de certaines approches bien consolidées à l'analyse de la ville. Une **ouverture vers l'urbanisme** est pour moi inévitable, et pour plusieurs raisons. D'abord de par mon parcours personnel (avec ma double formation en géographie et en aménagement urbain), ensuite parce-que la géographie urbaine théorique et quantitative s'engage de plus en plus dans ses implications en matière d'aménagement, en problématisant l'analyse des espaces urbains (quel diagnostic ? quelle évaluation en vue des enjeux de durabilité urbaine?), en

explorant les futurs possibles de la ville (géoprospective urbaine) et en identifiant dans ses analyses des préconisations (fortes/faibles) pour son aménagement. Cela justifie le sous-titre que j'ai donné à l'essai « enjeux de connaissance pour le géographe et pour l'urbaniste ».

Mais le **caractère interdisciplinaire** de cet essai est encore plus marqué dans la mesure où les questionnements géographiques et urbanistiques croisent des approches issues de la science de la complexité et de l'intelligence artificielle. La **science de la complexité** est en réalité une approche à l'étude des systèmes qui est transversale à différents domaines disciplinaires (de la physique à la biologie, en passant par l'écologie et l'économie). Le caractère transdisciplinaire de cette approche la rend précieuse dans l'étude des systèmes urbains. En même temps, il doit nous mettre en garde contre le fait de perdre de vue ce qui est spécifique au système urbain, notamment le fait d'être un système social, d'avoir une organisation spatiale et des formes physiques à toutes les échelles d'analyse. **L'intelligence artificielle**, en revanche, nous ouvre sur les théories et les méthodes des sciences informatiques. Elle a été une source d'inspiration essentielle dans mes recherches, permettant de relever les défis de la connaissance incertaine liées à la complexité du système urbain.

Les **enjeux sociétaux** du sujet traité sont de taille, précisément dans la mesure où la géographie urbaine s'ouvre à l'aide à la décision en aménagement urbain et en urbanisme. Je peux alors identifier un ensemble d'enjeux qui s'impliquent réciproquement et parfois même se télescopent.

D'abord, la recherche se lie au débat sur la capacité des acteurs publics, et même des systèmes de gouvernance plus élargis, à produire des interventions cohérentes et efficaces et sur les systèmes complexes qui sont les villes. Les échecs répétés de l'urbanisme au cours de son siècle et demi d'histoire avaient déjà produit des premiers essais critiques à partir de l'ouvrage fondateur de Jane Jacobs (1961). On critique notamment la non prise en compte de l'auto-organisation de la ville et la confiance aveugle dans des approches technocratiques descendantes (*top-down*) souhaitant imposer des partis pris d'aménagement.

Mais le problème concerne à la fois la méthode (gouvernance élargie et participative versus approche descendante) et les théories éclairant la vision que les acteurs (et surtout les décideurs) ont de l'espace urbain. Or, comme déjà souligné par Jacobs, cette vision vient du monde académique, et géographes et urbanistes y ont joué un rôle particulier. Ce second enjeu est à la fois intellectuel et pratique : il existe un débat plus général (en géographie et en aménagement/urbanisme) sur la capacité des théories classiques de l'organisation spatiale de la ville à rendre compte de la complexité de cette dernière, surtout dans un contexte de grandes mutations mettant en crise les approches précédemment établies. Parmi ces dernières, on peut citer la théorie des lieux centraux, la théorie de l'accessibilité gravitaire comme base de l'organisation des réseaux et de l'interaction spatiale dans la ville, l'aménagement par zonage règlementaire, l'approches fonctionnalistes à l'espace urbain, etc. Ces théories ont guidé et ont justifié les solutions de l'urbanisme et de l'aménagement urbain au cours du XX^e siècle. Seront-elles capables de nous guider dans le siècle qui vient de s'ouvrir ? Si l'on peut trouver un lien commun à ces approches, elles font toutes abstraction des questions de forme et réduisent les rapports spatiaux dans la ville à une question de distances.

Or la question de la forme fait cruellement défaut également lorsque les interrogations portent sur les implications environnementales et sociétales de la croissance métropolitaine à dépendance automobile, un enjeu devenu central dans les politiques publiques en France et en Europe (comme le montre le livre vert sur les villes durables produit par la Commission Européenne il y a déjà vingt ans). Depuis les travaux fondateurs de Newman et Kenworthy (1998) on a rapidement opposé la ville compacte traditionnelle, à forte densité, fonctionnellement mixte et multimodale, à la ville étalée à faible densité dépendante de l'automobile. Mais il ne s'agit pas seulement d'une question de densité,

comme des travaux successifs ont commencé à reconnaître, notamment ceux de Robert Cervero soulignant la nécessaire prise en compte des trois Ds : densité, diversité et design. Les urbanistes américains du *New Urbanism* portent leur attention sur la multidimensionalité des questions de forme et sur l'intérêt de certaines solutions vernaculaires. J'y vois un début de reconnaissance de la complexité de la forme urbaine, dont on connaît très mal les implications en termes de fonctionnements urbains.

Un dernier enjeu est l'interrogation que nos sociétés effectuent actuellement sur le caractère incertain de leur futur. Nos sociétés dans leur ensemble, et nos villes en particulier, ne semblent plus suivre des schémas bien établis de développement permettant de déterminer un horizon certain de leur devenir. Les crises structurelles, les transformations sociétales, les bouleversements géoéconomiques des dernières décennies et les nouveaux questionnements, légitimes, sur la durabilité environnementale de schémas précédents, nous éloignent considérablement du contexte de la programmation économique et de l'aménagement des trente glorieuses. Le débat sociétal porte alors sur la nécessaire intégration du caractère incertain de nos connaissances sur les systèmes sociotechniques complexes. En particulier, la polémique a été ouverte par Nassim Nicolas Taleb (2007, 2012) sur l'incapacité des systèmes décisionnels et des théories qu'ils mobilisent, à se prémunir contre des événements catastrophiques hautement improbables (les « cygnes noirs »). Le nouveau concept d'antifragilité est proposé pour caractériser les systèmes capables de s'adapter et tirer profit des perturbations externes. Les critiques de Taleb portent surtout sur le secteur de la finance, sur ses acteurs privés, sur les politiques publiques qui interviennent sur lui, et sur l'incapacité des premiers comme des secondes à gérer des risques systémiques. Les acteurs ont même tendance à rendre les systèmes qu'ils gèrent de plus en plus fragiles aux aléas externes.

Ces critiques peuvent être facilement généralisables au domaine urbain. Cela a été fait notamment par deux urbanistes italiens, Ivan Blečić et Arnaldo Cecchini, dans leur ouvrage récent sur l'urbanisme antifragile (Blečić et Cecchini 2016). Mais encore une fois, les considérations très générales de ces auteurs doivent être enrichies par la prise en compte de la spécificité de la ville, de sa morphologie, des liens entre les formes et les fonctionnements urbains, notamment du fait que l'intervention de l'urbaniste se porte essentiellement sur les formes de la ville physique. Cette perspective a un intérêt certain pour tous ceux qui dans le monde académique, dans la pratique professionnelle ou dans la société civile, se penchent sur l'avenir de nos villes dans le contexte des mutations profondes de ces dernières décennies. Quelles caractéristiques physiques et organisationnelles aura la ville du futur ? Comment la préparer et, de manière très concrète, quelles décisions aujourd'hui sont susceptibles de parvenir à une organisation spatiale hautement résiliente et antifragile face aux inconnues du futur ? Devant l'attrait facile des solutions à haut contenu technologique, prôné par la vision de la *smart city* (Scientific American 2014), cette réflexion me semble incontournable. En passant, mon essai montrera également comment ne pas tomber dans le piège de la fuite en avant de l'optimisation technologique sans avoir préalablement compris le rôle central de la forme urbaine dans la résilience et l'antifragilité de la ville. On redécouvrira même la modernité insoupçonnée d'organisations morphologiques relativement anciennes, ayant tiré profit de l'intelligence collective urbaine sur des temps longs.

Six idées maitresses

En guise d'introduction d'un texte qui sera bien plus détaillé, je souhaiterai également résumer le fond de ma pensée en six points clés. L'essai est précisément animé par la volonté d'argumenter et justifier ces idées maitresses.

Primo - En suivant les suggestions de la pensée complexe d'Edgar Morin, la **ville** est un **système complexe auto-éco-organisé** que l'on ne peut pas appréhender par des théories « fortes » fondant des modèles déterministes omni-compréhensifs, d'autant plus dans une phase historique de profonde mutation de l'urbain. En même temps, la perspective de la prévision sans compréhension ouverte par l'exploitation en boîte noire des données massives me semble à la fois dangereuse et intellectuellement peu fertile. La perspective plus prometteuse me semble être celle de la coexistence de théories « faibles », trouvant un cadre commun dans l'approche de la ville complexe et intégrant l'incertitude dans toutes les phases du processus de production des connaissances. **L'incertitude** est une **caractéristique essentielle** de la connaissance que l'on peut avoir de ce système complexe. Ce point de départ de ma réflexion se nourrit de quelques contributions théoriques et méthodologiques personnelles liées à la complexité urbaine et à la connaissance incertaine, que je présenterai au cours de l'essai.

Secundo - Beaucoup d'auteurs ont déjà investigué la complexité liée aux interactions des agents urbains, qualitativement dans l'analyse des systèmes de gouvernance (Healey 2006, Innes et Boher 2010), ou quantitativement par des modèles de géosimulation de plus en plus sophistiqués (Portugali 2000, Benenson et Torrens 2004, Batty 2005, 2013, Banos 2013, etc.). Or, je pense que **le géographe et l'urbaniste ont une légitimité à aborder la complexité de la ville également par l'entrée de son organisation spatiale et de la complexité structurelle de cette dernière**. C'est cette entrée qui sera privilégié dans mon essai. L'organisation spatiale n'est pas une simple conséquence du fonctionnement du système complexe, elle en est partie intégrante, avec une inertie temporelle relativement importante (héritages, potentiels de réorganisation future, *path dependency*) et des spécificités qui lui sont propres. De surcroît, cette entrée est **plus proche des besoins de l'intervention sur la forme physique de la part des urbanistes et la plus directement liée à l'étude des formes empiriquement observables**. L'entrée par la forme urbaine trouve également une autre justification, liée à un choix de stratégie de recherche soutenu par Salingaros (2005) : **dans l'étude de processus mal connus, comme souvent dans les systèmes complexes, la morphologie observée peut offrir la seule base disponible pour essayer d'appréhender les mécanismes hautement complexes sous-jacents**.

Tertio - **L'organisation spatiale de la ville est à la fois : organisation spatiale des relations socio-fonctionnelles** (flux, échanges, rapports de hiérarchie, spécialisations sociales et fonctionnelles... bref la spatialité des fonctionnements humains de la ville) ; et « **forme urbaine** », c'est-à-dire organisation spatiale des composantes physiques de la ville. Les **liens** entre ces deux aspects sont **multiples** et font l'objet d'un important effort de recherche, renvoyant également à d'autres fonctionnements du système complexe. Mes recherches au cours de ces années ont ainsi exploré ces deux volets de l'organisation spatiale urbaine et métropolitaine, y compris leur interaction, avec une prise de conscience croissante de leur complexité.

La complexité de la forme urbaine ne se laisse pas réduire à l'approche de la complexité agrégée dynamique, fondant les modélisations par automates cellulaires ou systèmes multi-agents, approche pour laquelle la forme est un pattern émergeant d'interaction entre éléments qui ne possèdent pas de forme en eux. **La forme urbaine** se décline à toutes les échelles d'observation et est elle-même un **concept polymorphe et polysémique** (Lévy 2005) renvoyant à une complexité combinatoire de plans d'observation qui est en forte résonance avec les principes de la complexité généralisée identifiés par Morin. Un enjeu scientifique majeur est celui de relier des approches qualitatives et holistiques à cette complexité avec les avancées de l'analyse spatiale. A la **forme physique des tissus urbains**, structurant la perception et l'appropriation de l'espace surfacique de la ville (selon les trois grandes écoles

classiques de la morphologie urbaine en Italie, au Royaume-Uni et en France), il convient de rajouter l'approche de la **configuration** (la syntaxe spatiale de Bill Hillier, l'analyse de centralité multiple de Sergio Porta), structurant le mouvement et le contrôle de l'espace réticulaire de la ville et empruntant une entrée « réseaux complexes » à la spatialité de l'urbain. De ce point de vue, mon apport de recherche a été de montrer comment **l'analyse spatiale géocomputationnelle peut se saisir de ces deux grandes approches** à la forme urbaine qui apportent des regards complémentaires à sa complexité, en emboitant le pas d'auteurs qui ont souvent proposé des démarches hybrides d'analyse géocomputationnelle de la forme urbaine (Badariotti, Gil, Omer, Salingaros, Van Nes).

Quarto - À un niveau encore plus général, l'entrée forme urbaine peut aujourd'hui **faire converger** deux grandes traditions dans la recherche urbaine. D'un côté, celle de **l'analyse spatiale** et de la géocomputation ; de l'autre, celle de **l'analyse culturelle et historique** des formes. La forme urbaine n'est pas seulement synergétique d'éléments en interaction, elle est également porteuse de sens pour ses usagers, sens culturellement, socialement et historiquement connoté, participant à la complexité de la ville en tant que système social (Vance 1991, Roncayolo 1996, Habraken 1998). La culture urbaine se révèle également être un mécanisme extrêmement puissant de coordination entre les nombreux acteurs de la ville, au même titre que les projets urbanistiques, qu'elle concourt en tous cas à fonder. Tout en m'inscrivant dans une approche d'analyse spatiale, je ne manquerai pas de souligner les ouvertures vers l'analyse de la ville en tant que fait culturel. Cette convergence demeure une **perspective particulièrement prometteuse pour mon agenda de recherche à venir**, susceptible de recoudre certaines fractures qui ont caractérisés les études urbaines au cours des dernières décennies.

Quinto - Si par l'analyse de la forme urbaine et de l'organisation spatiale des relations socio-fonctionnelles nous souhaitons parvenir à des conclusions plus générales sur le fonctionnement du système complexe qui est la ville, nous devons accepter de niveaux plus ou moins forts d'incertitude dans nos connaissances. Accepter cette incertitude veut également dire **identifier les protocoles les plus adaptés pour appréhender la connaissance incertaine et la rendre exploitable**. Dans cette direction j'ai particulièrement contribué au développement d'**approches bayésiennes** à l'analyse de l'organisation urbaine et métropolitaine, en m'attaquant à tour de rôle à la fouille de données (notamment en matière de relation forme/fonctionnement), à la formalisation de connaissances expertes incertaines, à l'exploration de futurs possibles/plausibles et à la recherche de régularités, conscient du fait que les situations archétypiques n'existent qu'en relation à d'autres situations plus hybrides et émergeant aux archétypes avec incertitude. Les approches inductives de fouille de données ont particulièrement montré l'intérêt d'intégrer des **pré-connaissances théoriques « faibles » au sein de démarches data-driven**, ce qui constitue pour moi un acquis important dans la perspective d'exploiter des données massives (*big data*) dans la recherche urbaine. En même temps, la formalisation des connaissances expertes et le retour d'expérience de cas d'études, suggèrent de ne pas délaisser la démarche bien plus classique du *small data*, tout en l'informant du caractère incertain de nos connaissances. Parfois j'ai couplé le cadre bayésien à d'autres approches statistiques plus classiques, ou bien je l'ai comparé à **d'autres méthodes issues de l'intelligence artificielle**, tels que les théories des possibilités et des évidences ou les réseaux de neurones. La **recherche** méthodologique en cette direction est **loin d'être achevée**, et **appelle à une plus étroite collaboration entre les sciences géographiques et les sciences informatiques**.

Sexto - L'approche de la forme et l'acceptation du caractère intrinsèquement incertain des connaissances sur le système complexe qui est la ville, peuvent **renouveler** à la fois la **démarche de connaissance du géographe** et les **stratégies d'intervention de l'urbaniste**. Ces deux regards peuvent converger dans la démarche de la géoprospective urbaine, consciente des incertitudes profondes liées

à l'exploration du futur et à la complexité de la spatialité urbaine. Ici aussi, mes apports personnels dans l'exploration des futurs possibles des espaces urbains, les connaissances acquises sur la complexité des questions de forme et sur leurs liens aux fonctionnements urbains à l'heure de la métropolisation, ainsi que les réflexions autour des auteurs qu'ont abordé l'aménagement de la ville complexe, pointent vers un agenda de recherche qui reste à accomplir. Son objectif devrait être l'identification de nouvelles stratégies, corroborées par les plus récentes recherches sur la complexité de la spatialité urbaine, pour **intervenir avec modestie épistémique** sur cette dernière **et parvenir à des villes plus résilientes et, dans la mesure du possible, antifragiles.**

Argumenter et étayer ces six points nécessite de relever un **défi intellectuel : faire converger des regards intellectuels qui ont tendance à rester relativement séparés.** Les travaux sur l'incertitude des connaissances sur les systèmes socio-spatiaux, notamment urbains, font souvent référence à la complexité des systèmes étudiés, y compris en termes socio-culturels et organisationnels, mais ne laissent pas de place aux réflexions sur la spatialité et, plus particulièrement, sur la forme urbaine (Hayek, Walker, Bleic et Cecchini, Moroni et, de façon plus générale, Morin et Taleb). Les recherches théoriques et méthodologiques de l'intelligence artificielle sur l'incertitude (Simon, Mandelbrot, Zadeh, Shafer, Pearl, Dubois et Prade, Wolfram) n'intègrent pas les questionnements qui sont propres au géographe et à l'aménageur dans la connaissance des systèmes urbains et de leur spatialité. Il existe deux grandes filières de recherche sur le lien entre la spatialité de la ville et la complexité des systèmes urbains. La première se focalise sur les interactions multi-agents et la géosimulation des systèmes urbains complexes (Allen, Portugali, Batty, Benenson) ; l'incertitude y est présente dans les problèmes d'équifinalité et d'imprédictibilité, mais aux dépens des questions de forme urbaine, se focalisant sur l'organisation spatiale des fonctionnements urbains. La seconde a comme point d'entrée la forme et la configuration urbaine ainsi que leurs relations avec l'organisation spatiale des fonctionnements urbains (Hillier, Cutini, Omer, Porta, Badariotti, Salingeros), elle s'ouvre également aux aspects culturels et historiques de la forme urbaine, mais ne laisse pas de place aux questions de connaissance incertaine. Les travaux qui étudient plus spécifiquement la dimension historique et culturelle de la forme urbaine rechignent à la fois aux approches computationnelles et aux questions de la connaissance incertaine et restent à un niveau très qualitatif et holistique dans la prise en compte de la complexité (toutes les écoles classiques de la morphologie urbaine de Caniggia à Conzen, mais également Alexander, Vance ou Habraken). Or, la question de la résilience et de l'antifragilité de la forme urbaine, de la capacité de cette dernière à s'adapter et à tirer profit de l'innovation sociotechnique qui est constamment produite par la ville, mais qui nous reste inconnue, oblige à la convergence de ces différents regards.

Contenu et structuration de l'ouvrage.

Deux types de recherches seront pris en compte dans les cinq chapitres du texte : d'un côté une **sélection de travaux clés** dans les domaines de la géographie urbaine et de l'urbanisme et parfois, de la science de la complexité ou de l'intelligence artificielle (permettant de réflexions plus transversales, métathéoriques et méthodologiques) ; de l'autre, **des travaux issus de mes recherches personnelles**, permettant de suivre, souvent à la fin de chaque chapitre, comment les réflexions produites dans le cadre de cet essai ont pu être mises en application, à des stades différents d'avancement dans mon parcours intellectuel. Mes lecteurs remarqueront également que, passeur d'idées et d'expériences entre la France, l'Italie et le reste du monde, ma bibliographie s'efforce d'articuler les ouvrages et les articles en langue anglaise (issus d'auteurs des cinq continents) avec des publications en français et en italien (parfois même en allemand) qui ont eu une diffusion géographiquement plus restreinte. C'est

une petite contribution, de ma part, à la reconnaissance des productions scientifiques que l'on peut apprécier dans nos deux belles langues romanes.

« Villes, Complexité, Incertitude » est en tout cas **une contribution scientifique bien différente de mes travaux de recherche** produits à ce jour. Il est une réflexion personnelle qui essaye de répondre au défi intellectuel susmentionné de la convergence de regards scientifiques, en défendant les points de vue rapidement esquissés dans cette introduction. Je ne manquerai pas de souligner la mesure dans laquelle mes recherches m'auront permis d'avancer dans le cheminement intellectuel qui a abouti à cet essai. Plus en général, les réflexions de cet essai constituent **le contexte intellectuel qui donne un sens**, parfois même rétrospectivement, **aux recherches conduites et qui structure mon agenda de recherche pour les années à venir**. L'enchaînement des chapitres est le suivant.

Le premier chapitre pose le cadre épistémologique et définit les concepts qui accompagneront le lecteur dans le reste de l'ouvrage, notamment ceux de connaissance, de complexité et d'incertitude. Il présente des réflexions que j'ai eu l'opportunité de développer à la fois dans un contexte interdisciplinaire et au sein de la démarche géographique. Il se conclut sur la reconnaissance du besoin de théories faibles pour guider l'analyse de la ville dans un positionnement de connaissance incertaine.

Le second chapitre esquisse le cheminement intellectuel ayant amené géographes et urbanistes à concevoir la ville en tant que système complexe organisé. Il présente également les principales directions de recherche dans l'étude de la ville en tant que système complexe et approfondit la question du principe de hiérarchie dans l'organisation de la complexité urbaine. Quelques recherches conduites à l'échelle régionale viendront étayer les réflexions sur les hiérarchies.

Le troisième chapitre examine quelles sont les spécificités de la complexité urbaine en termes de spatialité interne à la ville. Plus précisément il se focalise sur la question de la forme urbaine, concept qui est en soi polysémique et qui recèle une grande partie de la complexité structurelle de la ville. Il aborde ensuite la relation forme-fonctionnement en contexte métropolitain. L'ensemble du chapitre est illustré de recherches conduites de première main sur les espaces urbains et métropolitains de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Le quatrième chapitre est dédié aux théories et aux méthodologies permettant d'appréhender l'incertitude dans les connaissances sur la ville. Il propose un dialogue avec les concepts et les approches de l'intelligence artificielle, tout en soulignant ce qui est spécifique aux analyses et aux modélisations produites pour la compréhension des formes et des fonctionnements urbains et métropolitains. Des nombreux exemples provenant de recherches conduites sur différents terrains et à différentes échelles, montreront la faisabilité et l'intérêt de ces approches.

Le dernier chapitre est mon agenda de recherche pour les années à venir, visant à développer une géoprospective de la ville résiliente et antifragile. Il propose une plus étroite convergence entre les recherches analytiques du géographe sur la spatialité de la ville et les relations forme-fonctionnement, et les préoccupations de l'aménageur et de l'urbaniste pour organiser la ville du futur. Il propose également de poursuivre le dialogue avec l'intelligence artificielle en matière d'incertitude profonde. J'y défend une vision alternative à la *smart city* et au rôle central qu'y joue l'innovation technologique : la ville intelligente de demain, résiliente et antifragile, aura comme pivot sa forme physique et sera attentive au contenu informationnel et culturel codé dans les morphologies, hautement complexes, hérités du passé. Cela ouvre une dernière perspective pour la géographie urbaine : la convergence des approches quantitatives et computationnelles avec les approches culturelles et historiques à la forme urbaine.

Bonne lecture.

1. Paradigmes interprétatifs pour la ville et ses transformations métropolitaines

1.1 Les mutations des espaces urbains et des attentes de connaissance

La ville change

Les villes ont été marquées par de profondes mutations au cours des dernières décennies, touchant à la façon d'organiser l'espace urbain, de s'y déplacer, de se l'approprier, d'y insérer des nouvelles fonctions et de nouveaux types de tissus (espaces résidentiels périurbains plus ou moins fermés, quartiers des affaires, concentrations commerciales périphériques, technopôles).

Plusieurs auteurs désignent ces transformations de la ville, de ses structures et de ses fonctionnements, concomitant au développement des systèmes et des pratiques de mobilité, sous le terme de transition urbaine (Wiel 1999, Bunting et Fillion 2006). Wiel (1999) ainsi que Newmann et Kenworthy (1998) soulignent le rôle de la mobilité facilitée et des grandes forces socioéconomiques en jeu dans le passage de la ville traditionnelle, dense et compacte, structurée par la pratique de la marche et par les infrastructures des transports en commun, à la ville actuelle, étalée, éclatée et tendanciellement polycentrique. En se focalisant sur les formes urbaines bâties, Portzamparc (1997) identifie le passage d'une ville de l'âge I, aux morphologies d'îlots fermés, à une ville de l'âge II, aux morphologies ouvertes où l'îlot explose, et même au début d'une âge III, où l'îlot semble revenir, tout en laissant des morphologies bâties discontinues qui font davantage de place à l'aléatoire. Il s'agit néanmoins d'un diagnostic controversé qui pourrait même être renversé si l'attention se portait de la morphologie du bâti à celle du réseau viaire : Newman et Kenworthy (1998) et encore plus Marshall (2005) montrent que les réseaux deviennent de moins en moins connectifs et évoluent vers des configurations fermées, avec des boucles et des culs-de-sac à l'intérieur de domaines bien délimités ; seuls les grands axes et les autoroutes urbaines continueraient à assurer la continuité des espaces métropolitains. Même les considérations sur l'étalement généralisé à faible densité autour de la ville-centre doivent être nuancées : la coalescence de l'expansion urbaine à partir de différents noyaux ainsi que l'émergence de nouvelles centralités périphériques (technopôles, centre des affaires, concentrations commerciales), souvent associées à des nœuds de transports, produisent des structures complexes d'espaces plus ou moins denses. Ce qui est remis en discussion est alors le modèle simple de décroissance exponentielle des densités urbaines proposés par Clark (1967), considérant une structure monocentrique, équivalente au schéma bien connu de Von Thünen dans l'organisation de l'affectation des sols agricoles autour des villes.

En élargissant le champ de vision, d'autres auteurs parlent de métropolisation (Lacour et Puissant 1999, Leroy 2000) ou de métapolarisation (Ascher 1995) pour désigner le processus d'émergence de vastes aires métropolitaines densément connectées autour des plus grandes agglomérations. Par le concept de métapolarisation, Ascher (1995) d'abord, et Bourdin (2014) ensuite, raccordent les changements socio-fonctionnels observables dans la métropolisation de la fin du XX^e et du début du XXI^e siècle (qu'ils différencient de la première phase de formation des métropoles au cours du XX^e siècle) avec les changements des formes physiques des espaces urbains. Métropolitain est ce qui va au-delà de la ville classique, tant dans son fonctionnement que dans sa forme.

La façon de l'appréhender aussi

Or, **tant les théories géographiques que la pratique de l'aménagement sont remises en discussion par les nouveaux fonctionnements des aires urbaines et métropolitaines et les formes physiques qui y sont associées.** Plus particulièrement, la géographie de modélisation ne peut plus se reposer sur les modèles classiques et toute la construction de l'aménagement rationnel (celui du décideur public rationnel intervenant sur un système connaissable et contrôlable, voir Taylor 1998) est mise à mal. Les modèles de prévision sectoriels ont montré toute la limite des raisonnements « toute chose étant égale par ailleurs » : urbanisme, transports, démographie, modes de vie, questions environnementales et sociétales, symbolique des espaces, gouvernance urbaine, sont intimement liés, et les enjeux du développement durable de la ville obligent à les croiser et à proposer des nouveaux cadres théoriques.

Une première réponse à ces enjeux de la part des gestionnaires de l'espace urbain semble être le refus à suivre la communauté scientifique dans ses efforts d'élaboration de nouvelles théories pour la ville. Les solutions sont cherchées dans une technologisation croissante de la ville, de ses flux et de ses fonctionnements. La vision sous-jacente à l'engouement récent pour la *smart city* (Campbell 2013, Ratti 2013, Scientific American 2014) est une optimisation adaptative des fonctionnements urbains, grâce au déploiement de technologies ubiquitaires (senseurs, réseaux, infrastructures de données). On n'a pas forcément besoin de comprendre, et de planifier à long terme, l'important est d'optimiser en temps réel. Mais des approches fournissant des théorisations qualitatives, culturalistes, et intégrant le temps long de la ville reviennent également en vogue, comme les analyses des écoles traditionnelles de la morphologie urbaine (Vernez-Moudon 1997) ou les propositions holistiques de Ch. Alexander (1977, 2002-05). On reconnaît la plus grande complexité des questions à traiter, le caractère incertain des connaissances sur la ville et son développement. Il devient épistémologiquement difficile de défendre une modélisation prétendant pouvoir prévoir le développement spatial de la ville et l'optimisation de la localisation de ses fonctions et de ses équipements. Je pense que, dans ce contexte, l'analyse et la modélisation spatiale peuvent relever le défi posé par ces nouveaux regards sur la ville, sans tomber dans le piège d'une modélisation sans compréhension. Des nouvelles approches computationnelles viennent enrichir la trousse à outils du géographe quantitativiste et un dialogue plus profond avec l'intelligence artificielle permet également d'ouvrir nos analyses et modèles aux connaissances plus qualitatives. Surtout, il devient nécessaire d'ouvrir les thématiques urbaines à une approche de science de la complexité, au sens le plus large possible, comme celui prôné par E. Morin (1990, 1994, 2006) dans sa pensée complexe.

L'objectif du présent essai est d'abord celui de replacer la transition des formes et des fonctionnements urbains dans le paradigme de la complexité. Ensuite nous verrons qu'accepter la complexité du système ville implique également de revoir un certain nombre d'axiomes de connaissances bien ancrés dans la pratique scientifique du géographe et dans celle professionnelle de l'urbaniste. Cadres théoriques « faibles », incertitude des connaissances, impossibilité de prévoir le futur, etc. doivent se substituer à une approche encore relativement positiviste des phénomènes urbains. Les ouvrages, relativement polémiques, de Nassim Nicolas Taleb sur l'imprévisibilité des cygnes noirs ou sur l'antifragilité requise aux systèmes socioéconomiques (Taleb 2007, 2012) viennent appuyer la nécessité de cet *aggiornamento* conceptuel et méthodologique. On pourrait dire que les mutations des espaces urbains et la remise en discussion des cadres théoriques bien établis sont concomitantes à l'émergence de nouvelles attentes de connaissances sur les villes, corrélativement au débat sur leur développement durable, qui oblige à regarder vers un futur qui semble moins facilement saisissable. Ces considérations seront développées ultérieurement au sein de ce chapitre et du chapitre suivant.

1.2 Quel cadre épistémique pour la recherche dans ce domaine ?

La connaissance sur la ville n'est plus possible en termes de théories « fortes »

Actuellement, la **mutation accélérée des phénomènes urbains pousse la géographie urbaine et l'urbanisme à remettre en discussion les théories « fortes » qui fondaient le paradigme de la connaissance scientifique positiviste**. Le contexte culturel est celui de la pensée « faible » postmoderne (Vattimo et Rovatti 1983) : une connaissance objective fondée sur des théories reconnues comme vraies par la communauté scientifique serait hors de portée, car la multiplicité des regards, historiquement et culturellement situés, ne peut que déboucher sur une pluralité de conceptions. J'avoue avoir du mal à accepter la version la plus radicale de cette manière de voir, selon laquelle tout savoir, ou même toute hypothèse interprétative, serait équivalent. Dans nos pratiques disciplinaires nous sommes encore capables d'accorder un statut épistémique différent aux divers savoirs produits. Mais on reconnaîtra de façon générale la situation suivante : les théories classiques sur l'organisation des espaces urbains peuvent et doivent être remises en discussion, d'autres théories, ou d'autres schémas interprétatifs peuvent être avancés. L'échec des vieilles théories, la pluralité des alternatives possibles, l'impossibilité (pratique ? théorique ?) d'arbitrer de façon définitive entre elles, poussent à des formulations plus nuancées. Dans ce sens plus restreint, je parlerai alors de théories « faibles », migrant graduellement de l'état de la conjecture à celui de la connaissance admise, mais toujours possiblement défaisables (au sens de Levy 1977), comme devraient par ailleurs être toutes les connaissances scientifiques.

D'ailleurs, qu'est-ce que la connaissance ?

Quelques clarifications terminologiques me seront utiles dans la suite de l'exposé. Dans ce texte, **la réflexion épistémologique en géographie rencontrera souvent celle d'autres sciences humaines et sociales, mais encore plus celle de l'intelligence artificielle** (IA, Russell et Norvig 1994, Marquis et al. 2014), qui a dû s'obliger à une systématisation conceptuelle plus rigoureuse pour pouvoir résoudre des problèmes pratiques d'apprentissage et d'interaction avec le réel pour des agents artificiels. La première clarification à opérer est celle entre les concepts relativement proches de données, information et connaissance.

Selon MacFarlane (2013) les données sont les éléments factuels du monde qui sont sélectionnés et répertoriés car considérés dignes d'intérêt. L'information, en revanche, est une codification des données par un système de signes : elle peut être une image, un enregistrement instrumental dans la forme d'un code, une écriture, etc. Elle nécessite une interprétation pour devenir intelligible. C'est cette information qui a fait l'objet de la théorie de l'information de Shannon (1948) et, successivement, de toute la science informatique. L'information peut être stockée et traitée, même si par abus de langage on parle de base de données et de traitement de données.

Le concept de connaissance est un peu plus complexe. Comme l'information, on pourrait penser à la connaissance comme à un ensemble d'éléments stockés. Traditionnellement, l'ordinateur stocke et traite de l'information, le cerveau humain stocke et traite de la connaissance. L'intelligence artificielle est précisément la branche de l'informatique visant à permettre à des agents artificiels (logiciels, robots) d'accomplir des tâches d'acquisition, de stockage et de manipulation des connaissances qui sont traditionnellement le fait du cerveau humain. MacFarlane (2013) souligne ainsi que le nom de Connaissance Artificielle (*Artificial Knowledge*) serait beaucoup plus approprié que celui d'Intelligence

Artificielle (*Artificial Intelligence*), même s'il ne possède pas le même pouvoir de suggestion. Mais qu'est-ce qui différencie au fait une information d'une connaissance ?

Classiquement, pour Platon et pour Aristote, une connaissance est une croyance vraie que l'on peut justifier (*épistémè*). Ce cadre classique est à présent dépassé par la reconnaissance de nombreuses formes de connaissance qui ne rentrent pas dans la définition platonicienne explicite (Bara 1990, Rabino 1998). Une des plus importantes formes de connaissance non-explicite est ainsi la connaissance tacite (Polanyi 1966), que l'on ne saurait pas justifier car, non formalisée, elle est davantage liée à un savoir-faire, à la mise en place (pas forcément consciente) de procédures pour interagir avec le monde réel.

En général, on pourrait définir les connaissances comme des ensembles d'informations interprétées permettant d'avoir une « image » du monde réel et d'interagir avec lui (MacFarlane 2013). Parmi elles, les connaissances explicites sont effectivement des croyances que l'on retient vraies, selon la définition de Platon et Aristote. Ici l'image est construite consciemment dans un langage communicable (langage naturel ou langage plus formalisé). Or, même dans cette activité intellectuelle consciente, nous avons la possibilité de formuler d'autres croyances qui ne sont pas des connaissances au sens de Platon mais des hypothèses temporaires que l'on souhaite vérifier. Il existe donc un autre type de connaissance explicite, la croyance rationnelle (Audi 2015), pour lequel la connaissance platonicienne n'est qu'un cas très particulier. Pour continuer avec MacFarlane, la capacité des humains à formuler des croyances et à les tester dans l'action est essentielle à notre survie dans un monde en évolution constante. La flexibilité et la robustesse de cette capacité à acquérir et abandonner des connaissances nous a donné un avantage énorme par rapport à d'autres manières de coder la connaissance, propres également à d'autres espèces vivantes, par exemple par des instincts que l'on ne peut pas changer au cours d'une vie.

Les connaissances explicites produites par la recherche scientifique se qualifient également par le respect des normes et des protocoles de validation de la communauté scientifique, qui dépendent à leurs tours des paradigmes régissant la recherche scientifique, dans ses différentes disciplines, à une époque donnée (Kuhn 1962). C'est à ce type de connaissances que nous réservons aujourd'hui la catégorie de *épistémè*. On a l'habitude d'opérer d'autres distinctions au sein de ces connaissances explicites très particulières. On oppose ainsi souvent la connaissance descriptive à la connaissance explicative. Le projet scientifique de la géographie prémoderne aurait été celui de décrire le monde plus que de l'expliquer, le positivisme ayant par la suite réorienté la géographie vers la recherche de théories explicatives (Claval 1998). En ce qui concerne la géographie moderne, Harvey (1969) observe que cette différence est désormais de degré plus que de nature. Dans la recherche géographique, une bonne description est toujours un essai de description cognitive liant l'observable à des principes d'organisation. Dans les deux cas, la connaissance géographique est déjà une théorie : elle est la réduction d'une phénoménologie aussi riche que l'ensemble des données rassemblées (et potentiellement rassemblables) à un sous-ensemble de catégories logiques interreliés qui permettent une économie d'information pour leur description. Dans la mesure où certaines de ces relations entre catégories logiques sont des liens causaux, la théorie peut devenir explicative.

Une autre distinction importante est celle entre la connaissance spécifique, relative à un objet en particulier, et celle de la connaissance générique, liée à toute une classe d'objets. Cette distinction a fondé le projet scientifique de la nouvelle géographie théorique et quantitative, à partir des années 60 (Claval 1998). Depuis le positivisme, la géographie régionale classique avait pour objectif la description et l'explication de l'organisation spatiale de cas d'études, à différentes échelles (une ville, une région, un pays entier), considérés dans leur unicité et spécificité, au sein de relations causales communément

admises, très générales et ne faisant pas l'objet de recherche scientifique (notamment l'influence du climat et de la topographie dans l'organisation et le fonctionnement des sociétés humaines). Elle se situait en cela dans une approche idéographique. La géographie théorique et quantitative, néo-positiviste, se pose l'objectif plus ambitieux d'identifier des régularités qui constitueraient des connaissances généralisables, génériques, dans les relations existant entre les propriétés de classes d'objets géographiques semblables. Elle se pose ainsi un projet scientifique nomothétique, où la spécificité de chaque cas d'étude serait considérée seulement dans un second moment, en tant qu'écart à un modèle général.

Le dialogue que je souhaite établir entre la géographie et l'intelligence artificielle peut ici prêter à quelques malentendus. Le domaine des systèmes experts a ainsi été un des premiers domaines de succès dans le développement de logiciels à base d'intelligence artificielle (Russell et Norvig 1994). Il a, par là même, été un des premiers domaines d'application de l'intelligence artificielle à la recherche géographique (Guigo et al. 1995). Or, dans l'architecture très particulière des systèmes experts, le terme information désigne la description d'une instance, d'un cas particulier qui est utilisé comme une entrée par le logiciel. Le terme connaissance est en revanche utilisé pour désigner la règle régissant plusieurs instances, encodée par le modélisateur dans le système expert. Il existe ainsi une tradition dans la littérature de l'IA, où l'opposition entre information et connaissance n'est pas celle que je viens de présenter entre donnée codée et information interprétée, évaluée et jugée vraie, mais plutôt celle entre connaissance spécifique et connaissance générique. Le poids de la tradition des systèmes experts est tel que cette petite ambiguïté nous accompagnera au cours de cet essai, et je préciserai quand l'opposition entre connaissance et information sera à entendre au sens de l'ingénierie des systèmes experts.

Nous aurons toujours besoin de théories, de théories pour les sciences humaines et sociales

La réduction d'une vaste phénoménologie observable à une théorie plus synthétique est une partie importante du travail scientifique, en géographie comme dans d'autres disciplines (Harvey 1969). Elle est également une tendance naturelle de la pensée humaine (Taleb 2007) : nous ne pouvons pas stocker dans notre cerveau toute l'information que nous rencontrons, et nous avons tendance à identifier des *patterns*, des structures généralisant la multiplicité des objets et des phénomènes observés, nous fournissant des connaissances génériques très utiles à notre interaction avec le monde réel. On pourrait même avoir tendance à identifier davantage de *patterns* qu'il y en a véritablement dans les faits observables, introduisant plusieurs biais dans notre processus de production de connaissances. Taleb (2007) souligne surtout le biais de narration (on pense voir des relations là où il n'y en a pas, on sous-estime constamment la capacité des processus aléatoires à produire les mêmes résultats, etc.) et ensuite le biais de confirmation (une fois qu'une théorie est établie, on a tendance à rechercher dans les faits uniquement ce qui confirme la théorie et à négliger en revanche les éléments factuels susceptibles de l'infirmier). Taleb conclut en observant avec amertume que la posture agnostique et sceptique, dont il se fait l'avocat, semble très inconfortable à l'esprit humain. Ma conclusion est un peu différente : nous devons accepter la nécessité humaine à rechercher des connaissances génériques, des théories qui, au sein du travail du chercheur, ont vocation à être reconnues comme étant des théories scientifiques. Dans le contexte actuel de la géographie urbaine, et surtout en ce qui concerne l'étude de l'organisation spatiale des villes et des espaces métropolitains, je soulignerai corrélativement la nécessité de théories « faibles », pour lesquelles le chercheur effectue constamment un effort de remise en discussion et de comparaison à des théories alternatives ou même à l'absence de théorie.

Quelques spécificités concernent également le type de connaissance scientifique produite par la géographie et par les autres disciplines des sciences humaines et sociales (mais également par d'autres disciplines observationnelles comme l'écologie ou la géologie). En effet **la géographie, comme toutes les sciences observationnelles, ne peut pas extraire ses objets d'étude de l'environnement dans lequel ils sont situés**. On pourrait même dire que l'objet d'étude de la géographie est en grande partie l'interaction entre cet environnement et certains objets géographiques, avec une attention particulière à la spatialité de leur interaction. L'impossibilité à éliminer l'environnement est elle aussi responsable de l'impossibilité à construire de théories fortes sur des phénomènes épurés, étudiés en laboratoire dans l'absence d'interactions externes. **La pluralité des théories faibles est alors à mettre en relation avec la pluralité des regards possibles sur des objets d'études saisis dans leur environnement.**

Cette spécificité rejaillit également dans le régime d'administration de l'épreuve (Passeron 1991) qui est différent dans les sciences observationnelles de celui des sciences expérimentales. En géographie, comme dans d'autres sciences humaines et sociales, on administre rarement la preuve d'une théorie par expérimentation et vérification/réfutation selon le schéma classique poppérien (même si Popper 1963 parle de corroboration plus que de vérification). Normalement, une théorie est corroborée ou infirmée (et jamais de façon absolue) par accumulation d'indices circonstanciels convergents (Passeron 1991, Grignon 2008) étayant l'hypothèse du chercheur. Etudes de cas, expérimentations, simulations par modélisation, témoignages, sont autant d'indices employés dans ce processus de validation. Des situations épistémiques dans lesquelles des indices différents se répartiraient entre plusieurs théories concurrentes sont relativement fréquentes, obligeant encore une fois le chercheur à un cadre de théories faibles et partielles.

1.3 Repositionner ces questionnements scientifiques dans le paradigme de la complexité

L'inéluctabilité d'une vision « complexe »

Les systèmes socio-spatiaux étudiés par la géographie humaine sont communément qualifiés de « complexes ». Parfois ce qualificatif est employé dans son sens commun, indiquant seulement une certaine difficulté dans la compréhension des systèmes observés. Néanmoins, un nombre croissant d'auteurs utilise ce terme dans le sens plus précis qui lui est donné par le domaine émergent de la « science de la complexité ».

La science de la complexité a ses origines dans les recherches en cybernétique des années 40 (Wiener 1948). D'autres ouvrages en langue française permettent d'avoir un panorama des origines, des développements et des horizons actuels des sciences de la complexité, comme le numéro spécial de la revue *Hermès*, édité par Pena-Vega et Proutheau (2011). Dans ce qui suit, je me limiterai à quelques points clés qui seront importants dans la suite de mon argumentation.

La première grande distinction dans le domaine de la complexité est opérée par le physicien américain Warren Weaver. Dans son article fondateur *Science and Complexity*, Weaver (1948) oppose la complexité non organisée à la complexité organisée. La première est celle qui a intéressé d'abord la thermodynamique et ensuite la mécanique statistique : une multitude d'éléments possédant chacun un comportement aléatoire, peut être caractérisée par des propriétés statistiques qui se réfèrent au système pris dans son ensemble plus qu'aux éléments individuels. La seconde était à peine émergente dans les années 40 dans le domaine de la cybernétique mais montrait déjà un grand potentiel pour des disciplines aussi variées que la physique, la chimie, la biologie, l'économie ou la sociologie :

l'interaction entre les éléments s'effectue au sein d'une organisation, propriété émergente de ces interactions, qui rétroagit à son tour sur les interactions des éléments. La notion d'information, permettant de codifier la description de l'organisation, y joue également un rôle central. Weaver souligne également que les questions de complexité organisée se posent à mi-chemin entre les problèmes de type « simple » de la physique classique, qui analysait l'interaction entre un nombre très limité de variables, et ceux relevant de la complexité désorganisée cherchant à calculer des statistiques macroscopiquement significatives d'une quantité énorme de variables. La complexité organisée caractérise souvent des systèmes où un nombre relativement important (mais pas énorme) de facteurs sont interreliés dans un « tout organique ».

Ilya Prigogine (Prigogine et Nicolis 1977, Prigogine et Stengers 1984) développera plus particulièrement la réflexion sur l'émergence de l'organisation (auto-organisation) dans les systèmes complexes, ce qui lui vaudra par ailleurs le prix Nobel en chimie en 1977. Pour Prigogine, l'organisation se manifeste dans des structures qui peuvent émerger uniquement dans des situations de non équilibre qui perdurent pendant des temps suffisamment longs. Ici il faudra entendre « structure » dans le sens empirique du terme, comme étant un *pattern* macroscopique ayant une certaine stabilité dans le temps (ce qui le rend observable) et que le système complexe tend à préserver en répondant aux changements de son environnement. L'équilibre thermodynamique est en effet une absence totale de structures. L'observation de structures est en revanche la preuve de l'existence d'un système dissipatif, qui utilise des flux d'énergie liés à l'absence d'équilibre pour produire de l'ordre (négentropie). Par les structures, qui sont l'équivalent d'attracteurs locaux, le système parvient à un compromis entre équilibre et non équilibre, ordre et désordre : l'organisation interne du système, liée à ces structures, lui permet d'évoluer dans un environnement en déséquilibre perpétuel et de garder un certain niveau de désordre interne, pour faire face aux sollicitations d'environnement fluctuant. Pour Prigogine, un système complexe auto-organisé est toujours un système complexe auto-éco-organisé : il doit être ouvert sur son environnement pour nourrir son organisation interne.

La pensée complexe de Morin

Ce principe est au centre également des réflexions d'Edgard Morin (1990, 1994, 2006), qui étend l'approche de la complexité également aux sciences biologiques et aux sciences sociales. Pour Morin, comme pour Prigogine, un système auto-éco-organisé permet une augmentation corrélative à la fois de l'ordre et du désordre par le biais d'une organisation émergente (les structures). Mais de l'observation empirique des systèmes sociobiologiques, Morin dérive également l'impossibilité de réduire un système complexe à un seul principe de fonctionnement ou d'organisation. Bien plus souvent on y reconnaît des situations de dialogie où deux principes contradictoires devant s'exclure l'un l'autre, sont indissociables dans la complexité du système. Le système complexe devient alors pour Morin un défi pour la pensée qui souhaite l'appréhender, mettant en crise l'épistémologie de la science classique et même la compartimentation traditionnelle de la science en savoirs disciplinaires. Pour Morin, les systèmes complexes nécessitent une pensée complexe. Sept grands principes sont identifiés par Morin comme caractérisant la pensée complexe, pouvant fonder l'étude des systèmes complexes.

Le premier est celui de l'approche holistique du système : le tout est différent de la somme des parties en interaction, des propriétés émergentes ne sont pas identifiables dans chaque élément du système et, conversément, certaines propriétés des éléments pourraient être inhibées dans l'organisation de l'ensemble. Le second est le principe d'autonomie/dépendance que nous avons vu caractériser les systèmes auto-éco-organisés : ces derniers dépendent de l'interaction avec leur environnement, mais de cet environnement ils sont capables d'extraire de l'énergie qui leur assure

une certaine autonomie et stabilité organisationnelle. Le troisième est le principe hologrammétrique : les éléments des systèmes complexes portent encodées des informations sur l'organisation du système dans son ensemble. La cellule porte ainsi en son sein le patrimoine génétique régissant l'organisation de tout l'organisme vivant et les individus d'une société humaine intériorisent la culture, les mœurs, les principes d'organisation socioéconomique de leur société. Deux autres principes identifient des relations très importantes au sein des systèmes complexes auto-éco-organisés : les boucles de rétroaction (déjà identifiées en cybernétique), confondant les catégories classiques de causes et d'effets (car les effets rétroagissent sur les causes) et les boucles récursives, caractérisant le fonctionnement en générations des systèmes sociobiologiques (chaque élément est enfanté par les éléments de la génération précédente et produit, à son tour, les éléments de la génération successive). Le principe de récursivité est identifié également par Levin (2002) comme étant central à la complexité auto-organisée et adaptative des systèmes biologiques et sociaux : la capacité de ces systèmes à s'adapter à des environnements changeants est précisément liée à la variabilité existante à un moment donné entre les individus d'une population et au double processus tendant à réduire cette variabilité par sélection et à l'augmenter à nouveau par l'apparition de types innovants. Le sixième principe est celui de la dialogie, déjà présenté, reconnaissant la coexistence de notions qui seraient normalement en contradiction, mais qui révèlent de niveaux de réalité différents qui composent le système complexe : la coexistence de l'ordre et du désordre (grâce à l'organisation) est une dialogie fondamentale dans tout système complexe. De façon plus spécifique, Morin montre comment l'identité individuelle et l'anomie coexistent dans chaque individu en société et comment ces deux notions sont l'une et l'autre nécessaires aux fonctionnements sociaux. Finalement, le dernier principe de la pensée complexe revient à réintroduire l'être connaissant dans toute connaissance : de la perception individuelle à la connaissance scientifique, le sujet ne peut pas être effacé du tableau car il est porteur d'attentes, de valeurs, de paradigmes historiquement et culturellement situés. La connaissance d'un système complexe n'est alors pas une réverbération neutre de l'organisation du système sur le sujet connaissant, mais est le produit de l'interaction de ce sujet et de ses questionnements avec le système.

... et la complexité restreinte du mainstream

La pensée complexe de Morin est sûrement une des approches les plus cohérentes, complètes et, en même temps, révolutionnaires de l'étude des systèmes complexes. Morin appelle à pas moins qu'un changement de paradigme dans la recherche scientifique. Il fournit des perspectives pour raccorder des pans entiers de connaissance qui restent souvent déconnectés, notamment en ce qui concerne les sciences humaines et sociales, mais ne propose pas pour autant des modes opératoires détaillés. Le Moigne et Morin (2007), tout comme Byrne et Callaghan (2014), opposent à cette complexité généralisée nécessitant de nouveaux paradigmes épistémologiques, une complexité restreinte qui a fleuri au cours des dernières décennies. Andersson et al. (2014) identifient cette **complexité restreinte dans le *mainstream* de la science de la complexité issue des recherches du Santa Fe Institute à partir des années 1980.**

Pour Le Moigne et Morin (2007), tout en essayant de répondre à certaines spécificités des systèmes complexes auto-organisés, et en permettant d'importantes avancées méthodologiques et quelques ouvertures interdisciplinaires, cette science de la complexité restreinte reste dans l'épistémologie de la science classique. La problématisation y est encore prisonnière de telle ou telle tradition disciplinaire et le principe dialogique en demeure souvent exclu. Pour Andersson et al. (2014), les recherches du *mainstream* liées au Santa Fe Institute se caractérisent par une approche de formalisme mathématique ou algorithmique pour la simulation des interactions et des phénomènes d'émergence avec ses racines

dans les sciences naturelles. On peut dire autant des travaux de Holland (1995, 1998) et de Wolfram (2002). La focale est sur les dynamiques d'interactions entre entités élémentaires particulièrement simples pour identifier des mécanismes plausibles d'émergence de *patterns* (schémas récurrents relativement stables) à un niveau supérieur. Dans les sciences sociales, des processus faiblement structurés comme les mouvements des foules ou les patterns du trafic dans un réseau routier donné ont pu être bien appréhendés par ces approches. Les problèmes présentant davantage de structure (organisations sociales, marchés, systèmes géographiques) semblent plus réfractaires à ces approches. La simulation des dynamiques d'interactions auto-organisatrices a souvent promis de rendre compte de la complexité structurelle des systèmes sociaux empiriquement observables, mais n'y a jamais réussi (Lane 2006, Andersson et al. 2014).

Il faut néanmoins reconnaître que cette approche de la complexité, bien plus restreinte que celle de Morin, est en train de renouveler les recherches dans des nombreux champs disciplinaires. Par son biais, des cloisonnements disciplinaires commencent à être brisés (notamment entre la physique et l'informatique computationnelle, d'un côté, et les sciences humaines et sociales, de l'autre) et les différents principes de la pensée complexe peuvent se raccorder avec des pratiques disciplinaires plus établies.

Quelle complexité pour la géographie ?

Certains géographes s'étaient déjà inspirés de la pensée complexe pour offrir une vision holistique de la complexité de l'espace géographique (par exemple, Turco 1988). Il s'agissait néanmoins de lectures phénoménologiques et qualitatives de la complexité géographique, essentiellement liées à la prise en compte du jeu d'acteurs (et du jeu des pouvoirs) dans la production des espaces réels. En parallèle, au sein de la géographie théorique et quantitative, se développaient les premiers travaux de géosimulation des systèmes spatiaux complexes (qui verront une éclosion au cours des années 90), avec un plus grand effort de formalisation des méthodologies et des résultats des expériences, tout en se situant dans ce que Le Moigne et Morin auraient appelé une complexité restreinte.

Steven Manson publie un article fondateur (Manson 2001) pour clarifier les différents types de complexité, souvent importés d'autres traditions disciplinaires, auxquels les collègues géographes font référence. La première est la complexité algorithmique (complexité de Kolmogorov), liée à la pratique du développement informatique : c'est la complexité liée au calcul informatique et au stockage de l'information qui peut, indirectement, renvoyer à la complexité de la réalité décrite par cette information. La seconde est la complexité des trajectoires des systèmes déterministes non-linéaires : le chaos déterministe, déjà identifié par Poincaré (1908), qui rend impossible la prédiction au sein de systèmes pourtant caractérisés par un petit nombre d'éléments en interaction et par la connaissance précise des relations déterministes qui décrivent ces interactions. C'est cette complexité qui est responsable du célèbre « effet papillon », c'est-à-dire d'une sensibilité extrême aux conditions initiales, qui ne sont par ailleurs jamais connaissables de façon exhaustive et précise dans le monde réel. La troisième forme de complexité est celle qui est plus présente dans la littérature géographique : la complexité agrégée. Elle renvoie directement au *mainstream* de la science de la complexité du Santa Fe Institute, et au développement de modèles de simulation désagrégés où un nombre très important d'éléments en interaction fait émerger une organisation qui à son tour agit sur les éléments et assure une certaine stabilité comportementale au système dans son ensemble.

Dans le débat francophone, Dauphiné (2003) développe ultérieurement les réflexions sur la complexité en sciences géographiques. La démarche est inverse de celle de Manson : au lieu de partir d'emprunts de la géographie aux autres disciplines, il part de la reconnaissance des questions de

complexité qui se posent au géographe. Seulement dans une deuxième partie de son ouvrage il montre quelles approches et quelles théories (souvent des théories générales empruntées aux autres disciplines) peuvent être mobilisées pour aborder ces questions. Dauphiné reconnaît ainsi d'abord la complexité, qu'il appelle structurelle, des systèmes géographiques liée au grand nombre d'interactions entre les éléments du système. En réalité ce type de complexité correspond à ce que Manson appelle complexité agrégée, dans laquelle l'appréhension des structures est très sommaire et l'attention est portée sur la grande numérosité d'interactions et sur l'émergence de *patterns* (proto-structures).

Ensuite, Dauphiné souligne l'importance des complexités liées à l'imbrication des différents niveaux d'organisation et des différentes échelles géographiques des systèmes spatiaux : les deux peuvent éventuellement coïncider (un système local est une composante d'un système régional ou national), mais ne le font pas toujours, car deux niveaux d'organisation différents peuvent se déployer sur les mêmes échelles géographiques (le système des transports d'une ville est caractérisé par la même étendue spatiale que son système économique). C'est dans ces deux types de complexité que la forte structuration de l'espace géographique joue un rôle central, et pour lesquels, contrairement à Dauphiné, j'utiliserai collectivement le terme de complexité structurelle. La complexité liée au comportement imprévisible des systèmes spatiaux est en revanche liée à la non-linéarité des nombreuses relations qui les caractérisent. Néanmoins, en conclusion de son ouvrage, Dauphiné reconnaît que deux grandes familles de théories générales et d'approches analytiques et modélisatrices redécoupent ces quatre complexités géographiques : les théories du chaos déterministe et la théorie des catastrophes de René Thom (1972, 1983), par leur recours à une formalisation en systèmes d'équations différentielles, sont plus aptes à rendre compte des non-linéarités des systèmes, et de l'interaction entre un nombre limité d'éléments ou de niveaux d'échelle et d'organisation. Les théories de l'auto-organisation (Holland 1995, 1998, Wolfram 2002) et de l'auto-organisation critique (Bak 1996), font souvent recours à des modélisations algorithmiques de type automate cellulaire ou système multi-agents, et sont les plus à même d'aborder les questions de complexité structurelle (au sens de Dauphiné, pour nous complexité agrégée) et des imbrications d'échelle et de niveaux d'organisation. Le lien avec les formes fractales et les lois de puissance (voir Chapitre 3) semble connecter les deux familles d'approches. De surcroît, Dauphiné étudie de façon plus spécifique la capacité des différentes approches à aborder les questions d'organisation spatiale qui sont au cœur du projet scientifique de la géographie. La théorie de l'auto-organisation et de l'auto-organisation critique semblent ainsi cibler plus spécifiquement l'émergence de formes spatiales. La théorie des catastrophes, en dépit de la conceptualisation proposée par Thom sur le rôle central joué par les formes dans le fonctionnement des systèmes, reste davantage une théorie des dynamiques temporelles des systèmes complexes et de leurs trajectoires entre des « formes » qualitativement appréhendées dans l'espace des phases du système.

Pour O'Sullivan (2004), l'engouement récent des approches « systèmes complexes » en géographie va au-delà des réels apports de la démarche à la discipline. Beaucoup des principes identifiés par le paradigme de la complexité étaient déjà reconnus par les géographes sous d'autres termes et, à la limite, le fait que les premiers adopteurs de la complexité viennent d'autres traditions disciplinaires (physique, biologie, sciences informatiques) a fait souvent perdre de vue le caractère intrinsèquement spatial des systèmes complexes, pour se focaliser essentiellement sur leurs dynamiques temporelles.

O'Sullivan constate surtout la **tendance à faire coïncider l'étude de la complexité des systèmes géographiques avec la géosimulation par automates cellulaires et systèmes multi-agents** (Torrens 2002). Ces techniques de modélisation, en adoptant une approche « orientée objets », épousent aisément la vision selon laquelle l'interaction entre une multitude d'objets, qui instancient des classes

ayant des propriétés (variables d'état) et des méthodes (possibilités d'interactions), puisse faire émerger des propriétés macroscopiques des systèmes. O'Sullivan met en garde contre une certaine naïveté sur ces questions d'émergence : contrairement à la modélisation d'entités physiques en interaction, il existe des fonctionnements socioéconomiques et culturels et des ontologies d'organisation qui sont injectés, souvent de façon implicite, dans les modélisations d'agents humains. Les structures macroscopiques sont alors émergentes seulement dans la mesure où ces fonctionnements restent implicites. O'Sullivan critique aussi la légèreté épistémologique qui a porté plusieurs auteurs à affirmer que ces modèles de géosimulations constituent une manière pratique d'effectuer de la science expérimentale en laboratoire. Plus précisément, si ces modèles peuvent permettre d'effectuer de la science expérimentale, il faut reconnaître que l'objet de ces expérimentations sont les modèles et non pas l'espace géographique. La capacité des modèles à représenter la réalité géographique est loin d'être établie, et devrait obliger à une extrême prudence toute extrapolation hâtive du monde des modèles à celui de la surface terrestre. Mais O'Sullivan met également en garde contre l'acceptation implicite de l'ontologie orientée objets pour les systèmes géographiques : la complexité des systèmes étudiés par les géographes pourrait ne pas se laisser toujours aussi facilement réduire dans les catégories logiques des classes et des instances du modèle.

Lane et Maxfield (2005), ainsi que Andersson et al. (2014), rejoignent O'Sullivan dans une réflexion plus générale sur les modèles de simulations de la complexité agrégée appliqués aux sciences sociales. Si ces derniers souhaitent reproduire les mécanismes de l'émergence d'innovations dans les systèmes sociaux, ils n'y arriveront jamais dans la mesure où ils postulent une ontologie orientée objets qui reste figée. **Les processus historiques de formation des entités et des structures des systèmes sociaux posent des problèmes d'incertitude ontologique : nous ne pouvons pas séparer ainsi facilement état et ontologie de ces systèmes au cours du temps** et, sauf dans des courtes périodes où une certaine stabilité des entités peut être postulée, nous ne sommes même pas certains de ce que doivent être les entités de la modélisation. Si, d'autre part, nous prévoyons dans un modèle de simulation toute la suite des ontologies qui se succéderont dans le temps, la supposée émergence des innovations sera déjà contenue dans les hypothèses du modèle, comme justement observé par O'Sullivan.

J'accepte les mises en garde de O'Sullivan comme des balises conceptuelles et méthodologiques, mais je reconnais l'intérêt de l'approche systèmes complexes : il ne s'agit pas d'un rajout conceptuel gratuit car elle apporte une valeur ajoutée réelle à l'analyse des systèmes géographiques, notamment dans le cas des espaces urbains (voir Chapitre 2). Pour faire cela, il faut en revanche abandonner la vision simpliste selon laquelle l'approche des systèmes complexes équivaut à la géosimulation orientée objets et prendre le risque d'explorer les implications de la pensée complexe proposée par Morin aux spécificités des systèmes géographiques.

Dans la suite de mon essai, l'approche système complexe sera la toile de fond de nombreuses réflexions sur l'organisation spatiale des villes. La géosimulation sera très périphérique dans mon raisonnement, et j'essayerai de toucher à différentes implications de la pensée complexe pour guider la réflexion sur la ville. Surtout, dans ce qui suit, je montrerai dans quelle mesure la prise de conscience de la complexité des systèmes géographiques doit modifier nos attentes de connaissances sur eux.

1.4 L'incertitude de la connaissance des systèmes complexes socio-spatiaux

La certitude de l'incertitude

La question de l'incertitude me semble centrale dans la réflexion sur la connaissance de la ville appréhendée en tant que système complexe. Pour développer mon raisonnement, je ferai particulièrement référence aux travaux de deux collectifs scientifiques que j'ai animés et qui ont abouti aux publications « Faire science avec l'incertitude » (Fusco et al. 2015) et « *Questions of Uncertainty in Geography* » (Fusco et al. 2017). D'autres travaux, plus spécifiques, seront mobilisés dans le Chapitre 4, où il sera question des méthodologies pour la connaissance incertaine dans l'analyse urbaine.

Le concept d'incertitude a été d'abord introduit en économie par Knight (1921) pour élargir la vision classique de la théorie des erreurs et de l'évaluation du risque. Dans les trente dernières années il a fécondé la recherche fondamentale et appliquée dans plusieurs disciplines. Plus particulièrement, les mathématiques appliquées et les sciences informatiques ont développé des théories formelles de la connaissance incertaine (Shafer 1976, Zadeh 1978, Dubois and Prade 1988, Pearl 2000, Halpern 2005) en intelligence artificielle. **En géographie, comme dans d'autres disciplines, l'incertitude est un concept chapeau (Fisher 2005) qui correspond plus ou moins bien aux cadres formels proposés par l'intelligence artificielle.** Incertitude devient alors un synonyme de connaissance imparfaite : connaissance incomplète, inexacte, imprécise, floue, disputée, ambiguë, impossible, etc.

Dans le cadre du collectif interdisciplinaire « Faire science avec l'incertitude » (Fusco et al. 2015), avec d'autres géographes, mais également des économistes, des archéologues, des historiens, des sociologues, des anthropologues, des linguistes, des psychologues et des philosophes, j'ai défendu une définition large de l'incertitude. Cette définition large est nécessaire pour englober sous le concept chapeau d'incertitude l'ensemble des questionnements que les chercheurs en sciences humaines et sociales identifient comme relevant de la connaissance incertaine. Le risque serait de restreindre le concept au point de le faire coïncider avec les théories formelles de l'incertitude en intelligence artificielle, qui ne rendent pas compte de l'ensemble des questions posées par la connaissance en SHS. L'incertitude est en effet un concept relatif à un contexte de connaissance : il y a incertitude dès que l'on est en décalage avec une attente de connaissance dans un domaine donné. Ainsi, l'imprécision, l'indétermination, l'incomplétude, l'ambiguïté ou l'imprédictibilité sont autant d'éléments qui relèvent de la connaissance incertaine, dès lors que l'horizon attendu est celui de la précision, la détermination, la complétude, l'univocité ou la prédictibilité.

Dans le cadre du collectif, j'ai également interrogé la distinction entre incertitude ontique et épistémique, souvent opérée dans les sciences naturelles et dans les sciences informatiques (Petersen 2012), et des débats sont apparus. Cette distinction renvoie à l'opposition bien établie entre états ontique et épistémique pour un système physique (Atmaspacher 2001). Est ontique l'incertitude liée à l'état d'un phénomène qui ne suit pas des lois déterministes, comme l'état des électrons autour d'un noyau atomique, régi par des lois stochastiques, reflétant une variabilité intrinsèque du phénomène, disjointe de la connaissance que l'on peut en avoir. En revanche, on qualifie d'épistémique l'incertitude liée à la connaissance de l'état d'un phénomène, indépendamment du fait qu'il suive des lois déterministes ou stochastiques dans son fonctionnement non observé (Petersen 2012). Pour une partie du collectif, cette distinction était peut-être importante dans les sciences physiques, où les chercheurs estiment pouvoir établir des descriptions "ontiques" des phénomènes, c'est-à-dire des lois régissant ces phénomènes indépendamment des observateurs humains. En revanche, elle tend à s'estomper pour les sciences humaines et sociales. En effet, comment peut-on caractériser d'intrinsèque la variabilité des phénomènes humains et sociaux ? N'est-elle pas toujours liée à une

incertitude épistémique relative à des phénomènes appréhendés de façons approximative, imprécise, incomplète, etc. ? À un niveau plus conceptuel, les phénomènes humains et sociaux étudiés dans les SHS ne peuvent pas, par définition, exister en dehors d'un contexte d'observation humaine, celle du chercheur n'étant qu'un cas particulier d'observation. Les langues, les cultures, les organisations sociales, spatiales et économiques des êtres humains sont inséparables d'un contexte d'observation humaine, celui des acteurs qui participent à leur production, usage et transformation. On peut dès lors se poser plusieurs questions. Quel sens prendrait la recherche d'une conceptualisation de phénomènes indépendants d'un contexte d'observation ? Que voudrait dire une ontologie des objets sociaux sans observateur humain ?

Ce regard sur l'insignifiance pratique de la distinction entre incertitude ontique et épistémique dans le domaine social est partagé par Taleb (2007), qui parle de « distinction sans différence » tout en remarquant que des situations futures de connaissance pourraient tirer profit de l'existence des deux concepts.

De l'incertitude de l'information géographique ...

En ce qui concerne la géographie, les questions de l'incertitude (au sens le plus large du terme) ont vite été intégrées dans le domaine des systèmes d'information géographique (Duckham et al. 2001, Foody and Atkinson 2002, Zhang and Goodchild 2002, Longley et al. 2005, Fischer et al. 2006, Prade et al. 2010) et ont successivement investi la modélisation spatiale (Heuvelink 2002, 2007). Cette riche littérature, nourrie par les conférences biannuelles de l'*International Spatial Accuracy Research Association* (ISARA) et de l'*International Symposium on Spatial Data Quality* (ISSDQ), fait état d'importants développements pour la modélisation, la représentation et la manipulation de l'information géographique incertaine, tant dans sa composante géométrique (la localisation et la délimitation des objets géographiques) qu'attributaire (les caractères descriptifs des objets géographiques). La théorie classique des erreurs, issue de la métrologie, est désormais complétée d'approches novatrices mobilisant les probabilités bayésiennes, la logique floue, les probabilités imprécises, etc. Des problèmes spécifiques se posent en matière de fusion d'information multi-sources, de changement de support spatio-temporel (impliquant des opérations d'agrégation/désagrégation), de propagation des incertitudes dans les traitements, de représentation graphique de l'information incertaine. De nouveaux enjeux émergent dans l'évaluation des incertitudes de l'information géographique volontaire (Flanagin et Metzger 2008). Mais toutes ces questions sont loin d'être exhaustives de l'incertitude en géographie. Dans Fusco et al. (2017) j'ai même souligné comment la focalisation de la communauté scientifique sur l'incertitude dans l'information géographique a fait perdre de vue des questions beaucoup plus fondamentales, lorsque l'on passe de l'information à la connaissance géographique.

... à l'incertitude de la connaissance géographique

La criticité du passage de l'information à la connaissance avait déjà été identifiée par Helen Couclelis, dans son célèbre article « *The certainty of uncertainty : GIS and the limits of geographic knowledge* » (Couclelis 2003). Elle y observait que, contrairement à un système d'information géographique, le cerveau humain est capable de produire de la connaissance à partir d'informations. Or, observait-elle, il existe plusieurs situations dans lesquelles l'incertitude de la connaissance produite ne dépend pas de l'incertitude de l'information ou du manque d'expertise de celui qui manipule l'information. Dans ces deux cas, de la nouvelle information, plus abondante, plus précise, moins lacunaire, etc. et une meilleure expertise pourraient à terme réduire/éliminer l'incertitude des

connaissances. En revanche, l'abstraction imparfaite, la tension entre généralisation et fait particulier, et l'impossible fermeture logique (ou, d'un point de vue plus pratique, la non-calculabilité de la solution) sont à différents titres toujours présentes dans les trois types de raisonnement qui fondent la production de la connaissance géographique (le raisonnement abductif, le raisonnement déductif en contexte empirique et le raisonnement non-monotone). Ces caractéristiques peuvent produire des incertitudes dans les connaissances géographiques, incertitudes que l'on ne pourra pas rendre négligeables par l'amélioration de l'information de base et de l'expertise du traitement.

Il devient dès lors nécessaire d'élargir le regard de notre discipline sur les questions de connaissance incertaine qui se posent au géographe et de montrer de quelle manière elles peuvent être interreliées. À côté des questions bien balisées d'incertitude dans l'information géographique et dans sa représentation graphique (et plus particulièrement cartographique), j'ai ainsi identifié, avec les collègues géographes du collectif « Incertitude et connaissance géographique » du laboratoire ESPACE, six autres grands domaines affectés par des questions d'incertitude : les définitions géographiques, l'explication des phénomènes géographiques, la complexité des systèmes géographiques, la géosimulation, la subjectivité dans les phénomènes spatiaux et l'intervention sur l'espace dans le cadre de l'aménagement et de la gestion des risques. Dans ce qui suit, j'argumenterai que **la question de la complexité des systèmes géographiques est centrale. D'elle découlent, directement ou indirectement, la presque totalité des incertitudes liées à la connaissance géographique dans les autres domaines considérés.** Cela est d'autant plus vrai que l'on adopte une vision morinienne de complexité généralisée.

L'incertitude de la connaissance d'un système géographique complexe

Il convient donc de revenir d'abord sur le lien entre complexité et incertitude. Qu'il s'agisse de complexité agrégée, avec propriétés émergentes et rétroactions, de prise en compte du caractère adaptatif des systèmes sociobiologiques, avec récursivité générationnelle et hologrammétrie informationnelle, ou bien des conséquences des non-linéarités, pouvant rendre chaotiques des systèmes déterministes relativement réduits, ou encore de l'impossibilité d'extraire les systèmes réels de leur environnement et d'en étudier des répliques en laboratoire, la complexité met à mal l'idéal laplacien de pouvoir connaître avec certitude l'état passé, présent et futur d'un système donné. La connaissance que nous pouvons avoir des systèmes complexes auto-éco-organisés est toujours incomplète, approximative et incertaine.

En économie, dans la tradition de l'école autrichienne, Hayek (1967, 1978) avait déjà reconnu comment l'ensemble des sciences sociales étudie des systèmes essentiellement complexes. **Hayek opère alors une distinction entre la connaissance (en matière d'explication comme de prédiction) de type détaillé et celle de principe.** La connaissance détaillée est celle qui permet d'identifier les causes et les conséquences de phénomènes et de processus pris individuellement. On parlera en revanche d'une connaissance, d'une explication ou encore d'une prévision de principe lorsque ces dernières portent sur des régularités (jamais absolues) qui surgissent lorsque certaines conditions générales sont satisfaites. Dans les sciences expérimentales, lorsque l'on est capable d'éliminer la complexité du système dans son environnement pour reproduire de façon isolée le phénomène d'intérêt, on peut parvenir à des explications et des prévisions détaillées. Dans les systèmes complexes étudiés par les sciences sociales observationnelles, cela n'est pas possible. Nous devons alors nous contenter d'explications (et de prévisions basées sur ces explications) qui sont toujours de principe : elles se réfèrent à des comportements typiques, évalués qualitativement, des systèmes complexes, comportement qui ont normalement lieu (tout en souffrant des exceptions) si certaines conditions

sont respectées. D'un point de vue opérationnel il n'est pas possible de préciser le temps, le lieu et la magnitude précise de ces événements : leur connaissance est qualitative. De surcroît, des incertitudes affectent également leur survenue ou non dans des situations particulières : est-ce que les conditions générales de survenue ont bien été respectées (leur vérification opérationnelle pouvant être à son tour incertaine) où bien sommes-nous en présence d'autres conditions, exceptionnelles, pas prises en compte dans le comportement typique du système ?

En développant sa réflexion à la fois sur les systèmes biologiques, écologiques et sociaux, Levin (2002) aussi souligne comment l'étude des systèmes complexes auto-organisés adaptatives est l'étude de systèmes limités dans leur prédictibilité. De manière plus générale, l'étude de ces systèmes est caractérisée pour Levin par une tension continue entre le connu, l'inconnu et l'inconnaissable, acceptant par-là l'impossibilité à la fois pratique et théorique d'une connaissance exhaustive, macroscopique et microscopique, de leur état et de leur devenir. L'imprédictibilité avait par ailleurs déjà été identifiée par Poincaré (1908) dans le chaos déterministe. Lorenz (1963) avait tiré les conséquences de ces non-linéarités déterministes dans l'appréhension des phénomènes météorologiques. Mais le chaos observable dans les phénomènes géographiques n'est pas absolu. O'Sullivan (2004) remarque à juste titre que d'autres caractéristiques des systèmes complexes (notamment la convergence vers l'organisation qui est typique de la complexité auto-organisée) créent une tension avec le caractère apparemment aléatoire et imprédictible de certains phénomènes géographiques. De son point de vue, et en suivant Phillips (1999), cette contradiction apparente entre convergence et divergence peut être résolue lorsque l'on considère l'échelle géographique de l'organisation des phénomènes et de leur analyse. La divergence et l'imprédictibilité à la micro-échelle peut ainsi être compatible avec la convergence vers certaines propriétés structurelles à la macro-échelle. Cette considération s'accorde également avec les réflexions plus générales développées par Schrödinger (1944) sur la nécessité d'avoir un grand saut d'échelle entre les phénomènes moléculaires et la vie d'un organisme biologique : seulement la très grande numérosité permet au mouvement aléatoire des molécules d'être compatible avec la stabilité des fonctionnements macroscopiques de l'être vivant. Cependant, et ici O'Sullivan rejoint Hayek, les propriétés structurelles macroscopiques des systèmes géographiques peuvent être connues seulement qualitativement.

Je serais alors tenté d'adopter la vision proposée par ces auteurs, mais il faudra le faire avec une mise en garde. Cette dernière concerne le rôle que les phénomènes non-typiques peuvent avoir dans le fonctionnement et dans l'évolution des systèmes complexes. Cela revient à poser le problème des cygnes noirs que Taleb (2007) définit précisément comme ces phénomènes hautement atypiques (et donc extrêmement rares) qui ont un impact important sur le comportement du système et sur son évolution future. Si le phénomène étudié suit une loi de puissance, comme c'est souvent le cas dans la plupart des phénomènes sociaux, on pourrait questionner l'idée même de phénomène typique et comportement typique : comme nous aurons la possibilité de voir successivement, les phénomènes distribués en loi de puissance n'ont pas de comportement typique. **L'anticipation qualitative des phénomènes typiques reste, dans la mesure du possible, la seule option opérationnelle qui s'ouvre au chercheur en sciences sociales.** Nous devons néanmoins le faire en prenant conscience du fait que des **phénomènes extrêmes et atypiques, non prévisibles *ex ante*, et ayant un rôle fondamental dans les fonctionnements et les évolutions des systèmes,** pourront néanmoins se vérifier. Ces considérations seront d'une importance capitale lorsque l'on se penchera sur la prospective des systèmes géographiques, l'anticipation de leur devenir et les implications pour l'intervention consciente dans une démarche d'aménagement de l'espace (Chapitre 5). Ce que nous retiendrons ici est l'inéluctabilité d'une connaissance incertaine, qualitative et donc approximative, du comportement, même seulement typique, d'un système géographique complexe.

Concepts, explications, interprétations : l'incertitude est dans la complexité du système

Or, bien d'autres questions de connaissance incertaine dérivent, directement ou indirectement, de la complexité des systèmes socio-spatiaux. Dans « *Questions of Uncertainty in Geography* » (Fusco et al. 2017), je soulignais ainsi comment les concepts mêmes utilisés par le géographe dans ses analyses peuvent être incertains. L'identification de concepts généraux pouvant subsumer la variété des phénomènes observables dans les systèmes spatiaux est un exercice intellectuel très délicat, dans lequel nos capacités cognitives innées se combinent avec les protocoles disciplinaires. Cet exercice est habituellement affecté par des nombreuses incertitudes, qui sont parfois abordées dans les débats de la discipline. La complexité des systèmes spatiaux permet une multitude de niveaux de lecture, se focalisant sur des phénomènes différents, et permettant de donner des significations différentes aux concepts théoriques employés. La plupart des concepts de la géographie humaine sont concernés : ville, quartier, région, frontière, situation, aire culturelle, etc. en tant qu'objets géographiques et urbanisation, périurbanisation, métropolisation, globalisation, développement territorial, développement durable, etc. en tant que processus géographiques.

Selon Passeron (1991) les concepts théoriques des sciences sociales sont toujours polymorphes, ce qui introduit un certain degré d'incertitude et d'ambiguïté dans leur application (mon observation). On pourrait leur opposer des concepts définis *ad hoc* à partir des analyses empiriques, mais le problème de ces concepts « sténographiques » est leur faible potentiel de généralisation : ils ne sortiront pas du domaine très spécifique où ils ont été formulés sans introduire de nouvelles incertitudes (mon observation). Passeron examine également le rapport entre le formalisme quantitatif et la connaissance qui en découle dans les sciences sociales. Dans les sciences naturelles et expérimentales, le gain de la formulation se mesure dans la capacité à enregistrer une cumulation des expériences, mais l'auteur montre qu'il en va autrement dans les sciences de l'observation empirique où il y a reconstruction interprétative et, du coup, disproportion entre la précision opératoire d'un formalisme et l'approximation des actes de traduction. Le passage entre formalisme quantitatif et reconstruction interprétative est toujours nécessaire lorsque les quantités analysées sont des indicateurs de l'état, du fonctionnement ou de l'évolution d'un système complexe : on mesure une pression artérielle, on dénombre les délits reportés à la police, mais on interprète un état de santé d'une personne ou un niveau de sécurité dans le quartier. La question de la reconstruction interprétative est d'autant plus importante en vue du type d'objets étudiés par les sciences sociales, un point particulièrement abordé dans « *Faire science avec l'incertitude* » (Fusco et al. 2015), texte que je reprendrai directement dans son argumentaire. Suite au débat ouvert par le constructivisme social (Berger et Luckmann 1966), une importante tradition philosophique opère une distinction dans l'ontologie des objets. Searle (1995) distingue les faits qui existent indépendamment de nous (ontologiquement objectifs : par exemple le fait qu'il y ait de la neige au sommet de l'Everest) et ceux qui dépendent de nous, sujets humains (faits ontologiquement subjectifs : par exemple, le fait de considérer un ensemble de fibres de cellulose comme un billet de banque ayant une valeur monétaire).

Selon Smith (1996) ainsi que Casati et Varzi (1994), il y a d'un côté les objets physiques (qui existeraient indépendamment des êtres humains et de leurs institutions), et de l'autre les objets sociaux (qui découlent de l'intentionnalité collective des êtres humains et de leurs institutions). Les objets physiques peuvent être séparés en deux catégories : ceux que l'on reconnaît directement par nos capacités intellectives innées (objets physiques *bona fide*) et ceux qui nécessitent une convention définitoire entre scientifiques (objets physiques *fiat*). En créant des conventions de définition, les scientifiques ont tendance à faire glisser l'ensemble de leurs objets d'étude physiques dans la catégorie des objets *fiat*. En première approximation, la recherche en sciences naturelles s'attèle aux objets

physiques, tandis que les sciences humaines et sociales s'attachent aux objets sociaux, sans occulter nécessairement leur soubassement physique. S'il est vrai que les conventions de définition donnent une existence sociale aux objets physiques, il demeure une différence fondamentale à cet égard entre sciences naturelles et sciences humaines et sociales. En effet, alors que les conventions sociales qui définissent les objets physiques *fiat* sont élaborées par la communauté scientifique (sans oublier bien évidemment les dynamiques sociales propres à la construction des objets scientifiques), la plupart des objets sociaux sont des constructions sociales élaborées par des acteurs sociaux, avant même que le chercheur s'y intéresse, qui font ensuite l'objet d'une seconde construction sociale par le biais des conceptualisations savantes et des conventions des chercheurs.

À l'évidence, la connaissance des objets physiques peut être incertaine (problèmes de métrologie, prévision d'un état futur, etc.). La « double construction » ontologique des objets sociaux rajoute toutefois de l'incertitude à leur connaissance car leur compréhension dépend non seulement des catégories du chercheur (dites « étiques ») mais aussi de celles des acteurs sociaux qui les ont créées (dites « émiques », De Sardan 1998). Or, il n'est pas évident que ces catégories correspondent (incertitude de l'interprétation, incertitude des catégories logiques de l'analyse) : quand on interprète un objet social, on n'est pas sûr d'être dans le « vrai » concernant sa signification dans un contexte social donné, et cela d'autant plus s'il s'agit d'une société distante dans le temps ou par rapport aux référentiels du chercheur. Dans Fusco et al. (2017) les collègues archéologues ont fait état de la centralité de cette question dans l'interprétation des vestiges découverts (à quels objets se réfèrent ils ? quelles en étaient les fonctions ? quelles en étaient les significations sociales ?). Les incertitudes de l'appariement des ontologies étiques et émiques renvoient à l'impossibilité de séparer connaissance et connaissances dans une approche morinienne de complexité généralisée.

L'interprétation des objets sociaux est également centrale dans les démarches de la géographie sociale et culturelle, dès que l'on se penche sur la signification sociale des objets géographiques et des pratiques des espaces au sein de groupes sociaux ou de cultures (par exemple, en ce qui concerne les espaces vécus et perçus par les individus et, collectivement, par les groupes sociaux). Dans son compte rendu de l'ouvrage de Dauphiné sur la complexité en géographie, Di Méo (2005) avait ainsi promptement remarqué que l'herméneutique des sujets dans un contexte social contribue à la complexité des systèmes géographiques au même titre que la complexité agrégée ou la complexité structurelle. Cependant, il serait naïf de croire que des questions semblables ne se posent pas dans les démarches du géographe théoricien et quantitativiste. Le propre des systèmes complexes auto-organisés et adaptatifs est précisément d'évoluer structurellement dans le temps et par rapport aux différentes interactions avec leurs environnements respectifs. Rien de plus normal, alors, d'observer une grande variabilité, dans le temps et dans l'espace, des objets que le géographe essaye de subsumer sous les mêmes catégories interprétatives. Comme déjà observés, il est difficile de différencier nettement l'état et l'ontologie des systèmes complexes saisis dans leur évolution. Sans aborder la question de l'appariement avec l'ontologie émique des acteurs, Lane et Maxfield (2005) parlent à cet égard d'incertitude ontologique : nous ne pouvons pas être certains du bienfondé des catégories logiques avec lesquelles nous identifions les éléments et les niveaux d'organisation de ces systèmes.

En conclusion, l'incertitude dans les définitions et concepts relève du caractère inadéquat des catégories logiques que nous pouvons produire pour saisir une réalité complexe qui, au sens de Morin, est caractérisée par la coprésence de principes contradictoires provenant de niveaux de réalité différents, possède une ontologie qui évolue au cours du temps et pose également, en ce qui concerne les objets sociaux, le problème de la correspondance entre l'ontologie émique du contexte social dans lequel ses objets existent et celle produite par l'interprétation du chercheur.

Les incertitudes qui affectent le type de connaissance explicative produit par les géographes doivent également être comprises dans le contexte de la complexité des systèmes géographiques. Dans sa préface de Foody et Atkinson (2002), Curran (2002) fait une distinction entre l'incertitude de la mesure et celle de la compréhension. La première concerne l'exactitude et la précision des données spatiales et a été amplement traitée par la communauté des géomaticiens (voir supra). La seconde caractérise la confiance que nous avons dans l'explication des phénomènes. Or, au sein d'un système complexe auto-organisé, il est extrêmement difficile d'identifier des explications aux phénomènes observés qui soient dépourvues d'incertitudes. Quine (1953) avance l'argument que dans des contextes d'observation les données empiriques sous-déterminent toute explication théorique en termes de « lois » (plusieurs théories peuvent expliquer les mêmes données). Von Bertalanffy (1968) montre formellement que cela est souvent le cas pour les phénomènes qui ont lieu dans des systèmes ouverts, et utilise le concept d'équifinalité. Varenne (2015) développe les arguments de Quine et de Von Bertalanffy précisément pour la géographie théorique et quantitative (qu'il désigne de géographie de modélisation), pointant l'existence d'une double sous-détermination : les données empiriques sous-déterminent les lois statistiques (sous-détermination Lois/Données, car plusieurs lois de distribution statistique peuvent convenablement s'ajuster aux données) ; mais les lois statistiques sous-déterminent les processus géographiques (sous-détermination Processus/Lois, car plusieurs processus théoriques peuvent produire la même loi de distribution statistique). Cette double indétermination rejaillit sur l'incertitude du type de connaissance explicative que la géographie peut produire.

La causalité circulaire caractérisant les systèmes complexes auto-organisés rend également extrêmement problématique l'identification de mécanismes causaux pouvant expliquer des phénomènes observés. Comme nous aurons l'occasion de voir dans le Chapitre 4, la recherche de causalités est possible uniquement lorsque l'on délimite au sein du système complexe un sous-système plus réduit qui présente des asymétries temporelles marquées entre phénomènes pouvant être considérés externes et manipulables et phénomènes internes. Si ces phénomènes sont internalisés, des concepts plus holistiques comme celui de congruence entre phénomènes (voir Offner 1993) sont plus aptes à caractériser les relations existantes dans le système complexe, mais leur évaluation sera beaucoup plus qualitative.

Un autre aspect de l'incertitude des connaissances explicatives produites par le géographe est leur capacité à être généralisées. D'abord, les « lois » géographiques sont des régularités obtenues par analyse comparative, qualitativement (sur un nombre limité d'études de cas) ou quantitativement (par l'identification de régularités statistiques au sein de corpus appropriés). N'étant pas des lois naturelles déterministes, elles présentent des exceptions et sont spécifiques à un certain contexte spatio-temporel, précisément comme les concepts et les définitions (voir supra) et d'autant plus que l'on est dans le domaine de la géographie humaine. De ce point de vue, quelles incertitudes surgissent lorsqu'une connaissance générique est utilisée pour expliquer un cas d'étude spécifique ? Et quelles incertitudes caractérisent, d'autre part, la généralisation d'une explication trouvée dans un espace géographique à un autre ? La première question est liée au fait que les lois géographiques sont des résumés de propriétés systémiques (causalité générique), tandis que l'explication d'un cas d'étude donné est une question de causalité spécifique. Cette distinction est bien connue dans les sciences judiciaires (Federal Judicial Center 2011), et le passage entre les deux catégories de causalité produit d'épineuses questions d'incertitude. La seconde question mérite un éclaircissement. Face à un nouveau cas d'étude, les géographes n'appliquent pas aveuglement des lois qui avaient été déterminées dans un contexte différent. Lorsqu'ils le font, la loi est considérée comme étant une hypothèse à vérifier et son applicabilité au nouveau cas est par définition incertaine. Une

caractéristique du processus de production de connaissances dans les sciences sociales est précisément l'intérêt et le besoin de tester toujours les lois avec des nouvelles données. Une connaissance explicative n'est jamais absolument valide et les chercheurs doivent accumuler les évidences empiriques pour son bien-fondé ou pour les limites de sa validité en la confrontant avec des nouveaux corpus. Dans ce contexte, être conscient des niveaux d'incertitude des explications disponibles pour un phénomène donné peut améliorer les heuristiques de la recherche géographique.

Clairement, les incertitudes des connaissances explicatives et celles liées à l'impossibilité de mesurer précisément l'état d'un système complexe auto-organisé, rendent vaine la recherche de prédictions précises et fiables (Hayek 1967, 1978) sur lesquelles axer toute politique d'intervention sur ces systèmes. Cette situation est bien celle de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme qui, comme nous le verrons au cours des Chapitres 2 et 5, sont aujourd'hui appelés à s'engager différemment avec l'incertitude. Si les plans traditionnels avaient comme objectif d'éliminer les incertitudes résiduelles des prévisions par l'implémentation des mesures permettant la réalisation des objectifs, des nouvelles démarches sont aujourd'hui explorées pour intervenir sur un système spatial complexe (tout en étant partie de ce système) en contexte de connaissance incertaine.

Une connaissance sans incertitudes est fragile

Dans la préface déjà citée, Curran (2002) fait allusion à un certain pragmatisme dans la recherche en matière d'incertitude au sein de la communauté des géographes et des géomaticiens. En étant plus fréquente, de moindre ampleur et plus facilement traitable, l'incertitude de la mesure a absorbé l'essentiel de l'effort de recherche. L'incertitude de la compréhension, liée aux types d'explications possibles, aux concepts mobilisés et, in fine, à la complexité des systèmes étudiés, possède une magnitude bien plus élevée, admet Curran, mais heureusement elle est également beaucoup moins fréquente. De mon point de vue, cette observation anodine a des répercussions profondes. Des événements très rares avec des conséquences déstabilisantes sont précisément les cygnes noirs de Taleb (2007). **L'incertitude dans la compréhension peut alors facilement devenir le cygne noir dans le processus de production de connaissances du géographe, discréditant au passage notre contribution dans les processus décisionnels sur l'espace.**

Dans ce contexte, et c'est la conclusion de « *Questions of Uncertainty in Geography* » (Fusco et al. 2017), les géographes devraient accepter les incertitudes irréductibles comme une composante nécessaire du *modus operandi* et des résultats de la recherche. Les incertitudes possibles dans les connaissances explicatives, dans les concepts et dans les modèles proposés, devraient avoir priorité absolue par rapport aux incertitudes de mesure. Dans l'idéal, les programmes de recherche devraient être conçus de façon plus souple pour tirer profit de l'« incertitude positive » : de l'identification des ontologies des systèmes étudiés et des multiples théories possibles, au développement de modèles afférents, tout en considérant le contenu informationnel des évidences empiriques, considérer les incertitudes associées aux différentes phases du processus de production des connaissances géographiques devrait déboucher sur des heuristiques de recherche plus productives. Des connaissances conflictuelles, graduelles, vagues, imprécises... incertaines, sont le carburant naturel du travail scientifique. La connaissance certaine serait un cas extrême, et même un des moins stimulants dans la recherche géographique.

Faut-il pour autant une connaissance sans théorie ?

Une dernière considération doit être faite sur le bruit provoqué par un récent article de Chris Anderson (2008), rédacteur de la revue *Wired*, proche des milieux de la Silicon Valley. L'ère des

données massives (*big data*), dit Anderson, avec ses pétaoctets de données et sa capacité de calcul distribué, rend la méthode scientifique obsolète : nous n'avons plus besoin de théories, mais seulement de données et d'algorithmes pour leur traitement, nous n'obtiendrons pas des explications, mais les corrélations nous suffiront. Or, Anderson ne se limite pas à dire que cette manière de procéder est en train de s'affirmer dans les applications de marketing des grands acteurs de la toile comme Google, mais qu'elle pourrait et devrait remplacer les pratiques courantes de la recherche scientifique. Effectivement, à la lumière de ce que nous venons de voir, les systèmes complexes posent des difficultés insurmontables pour la formulation de théories omni-compréhensives de leur fonctionnement. En même temps, la grande disponibilité des données offre la possibilité d'extraire des connaissances, dans la forme d'associations récurrentes entre variables, sans passer par la formulation d'hypothèses théoriques. Taleb (2007) semble aller dans le même sens : toute théorie est fragile, il faut se tenir à la phénoménologie. Plusieurs questions se posent alors : d'abord quelle est la valeur de ces connaissances ? Ensuite, est-il vrai que ces connaissances sont extraites en absence de théorie ?

Sur la seconde question, je pense qu'on ne peut pas être aussi naïf : les variables mêmes utilisées dans la fouille de données sont l'implémentation d'une ontologie de domaine et découlent par conséquent de présupposés théoriques que l'on ne pourrait pas ignorer. De surcroît les stratégies les plus fécondes dans la fouille des données passent toujours par une phase de sélection des variables (*feature selection*), qui renvoie à son tour à d'autres présupposés théoriques des analystes en ce qui concerne le type de variable dont il vaut la peine d'étudier les possibles associations. Différentes hypothèses pourraient également étayer cette phase de sélection, mais il est vrai qu'il s'agit d'hypothèses bien plus faibles par rapport à la démarche hypothético-déductive classique. On ne formule pas des théories fermées et cohérentes, dont il s'agit de valider certaines déductions logiques par le biais de l'analyse des données. On avance de façon relativement souple plusieurs hypothèses ouvertes et dans le meilleur des cas, lorsque ces hypothèses portent sur des possibles mécanismes explicatifs, on rentre dans le domaine de l'abduction (inférence aux meilleures causes à partir des données observables). Si la fouille de données est vraiment effectuée sans aucune hypothèse interprétative, il s'agit d'une fouille exploratoire, permettant d'avancer ces hypothèses dans un second moment. Je ne vois vraiment pas comment le travail du chercheur pourrait faire l'économie de ces passages.

En faire l'économie reviendrait à poser de façon encore plus cruciale la première question : quelle est la valeur des connaissances acquises ? Pouvons-nous nous satisfaire de connaissances purement inductives ? Comment en définir les limites de validité ou, si l'on souhaite sortir de la vision binaire des connaissances platoniciennes, les incertitudes dans leur validité ?

Si l'on souhaite relever les défis posés par ces questions, je pense que les données massives et la disponibilité du calcul distribué peuvent en effet élargir les limites des pratiques scientifiques courantes, mais à condition de ne pas tomber dans le raccourci intellectuel d'Anderson. Banos (2013) montre que les données massives peuvent également être celles produites par l'exploration de l'espace des paramètres des modèles de géosimulation, ouvrant des nouvelles perspectives à la relation entre modèles, théories et outils computationnelles des données massives. Reuillon et al. (2015) proposent la plateforme de calcul intensif OpenMole pour aborder la question épineuse des incertitudes des connaissances explicatives fournies par les modèles en contexte d'équifinalité. Ainsi Pumain et Reuillon (2017) utilisent une architecture de simulation permettant de coupler et hybrider une pluralité de mécanismes explicatifs, concurrents ou convergents, pour la croissance urbaine des villes post-soviétiques. L'exploration de l'énorme masse de données des résultats des simulations, obtenus par l'exploration de l'espace des paramètres du modèle, permet d'identifier les combinaisons

les plus plausibles de mécanismes explicatifs associés avec les données correspondant aux évidences empiriques. Il s'agit d'une démarche bien éloignée du *big data* sans théorie prôné par Anderson.

Clairement, si l'on accepte la pluralité d'hypothèses possibles pour des phénomènes observés comme conséquence de l'impossibilité de fournir une théorisation fermée des fonctionnements et de l'organisation des systèmes complexes, nous devons encore une fois accepter le caractère relativement plus incertain des connaissances produites : le statut épistémique des approches inductives et abductives est plus faible que celui de l'approche hypothético-déductif. **Pas de science sans théorie, donc, mais probablement une migration vers des nouveaux équilibres dans le triptyque données-théorie-incertitude au sein du processus de production des connaissances géographiques.**

Nous allons voir dans le prochain chapitre comment le cadre épistémique que je viens de poser, fait de complexité et de connaissance incertaine, peut et doit éclairer la recherche conduite sur les espaces urbains.

Travaux personnels cités dans le chapitre

Fusco G., Bertonecello F., Candau J., Emsellem K., Huet T., Longhi Ch., Poinat S., Primon J.-L., Rinaudo Ch. (2015) Faire science avec l'incertitude : réflexions sur la production des connaissances en Sciences Humaines et Sociales. *Incertitude et connaissances en SHS : production, diffusion, transfert*, 23-24 Juin 2014, Nice, France. 2015. <halshs-01166287>

Fusco G., Cagliioni M., Emsellem K., Merad M., Moreno D., Voiron-Canicio C. (2017) Questions of Uncertainty in Geography. *Environment and Planning A*, July 2017, vol. 49(10), pp. 2261–2280, <https://doi.org/10.1177/0308518X17718838>

À retenir

- La ville est en mutation accélérée et pose des questions de durabilité. Les théories urbaines classiques sont mises en crise. Le besoin émerge d'une nouvelle connaissance géographique sur la ville pour appréhender ses transformations les plus récentes.
- Les théories sont essentielles pour la connaissance : elles synthétisent la variabilité de la phénoménologie observable et fournissent des connaissances génériques de grande utilité. Cependant, nous avons tendance à produire plus de théorie que ce qui est supporté par les faits.
- Traditionnellement géographes et aménageurs cherchaient des théories « fortes » pour expliquer et prévoir les phénomènes urbains, dans une approche néo-positiviste. La tendance actuelle est celle des théories « faibles » mieux appropriées à la connaissance en SHS.

- Le cadre dans lequel il faut repositionner la connaissance des systèmes géographiques est celui de la science de la complexité. Morin a proposé un nouveau paradigme épistémologique, la pensée complexe, qui ne retrouve qu'une mise en application partielle et restreinte dans les approches opérationnelles de la science de la complexité. Cela est vrai également en géographie.
- En dépit des quelques mises en garde, je reconnais l'intérêt de l'approche systèmes complexes en géographie, mais je souhaite ne pas la réduire à la complexité restreinte de la géosimulation. J'essayerai alors de féconder la réflexion sur la ville et son organisation spatiale par des renvois plus généraux à la pensée complexe.
- La question de l'incertitude est centrale. Les géographes ont besoin d'une définition large de l'incertitude dans les connaissances qu'ils produisent. Des transferts théoriques et méthodologiques depuis l'IA peuvent être fructueux, tout en présentant certaines limites.
- En géographie, il existe un engouement récent pour les questions d'incertitude dans l'information géographique, mais celles-ci sont loin d'être exhaustives et d'autres, beaucoup plus fondamentales, émergent lorsque l'on passe de l'information à la connaissance géographique.
- Les plus grands enjeux de connaissance incertaine pour le géographe sont liés à la complexité des systèmes spatiaux : la connaissance que nous pouvons avoir des systèmes complexes auto-éco-organisés est toujours incomplète, approximative et incertaine.
- On peut dès lors rapporter bien d'autres questions d'incertitude à la complexité des systèmes socio-spatiaux : les concepts, les explications, les modélisations, les connaissances subjectives, les démarches d'intervention sur l'espace, posent aussi des questions de connaissance incertaine en lien avec la complexité du système.
- Se focaliser sur l'incertitude de l'information revient à rendre le travail du géographe fragile aux cygnes noirs du processus de production de connaissance. Mais l'impossibilité d'une théorisation fermée pour les systèmes géographiques complexes ne veut pas dire que l'on puisse faire une science sans théorie.

Questions ouvertes

Pourquoi faut-il appréhender une ville ou une aire métropolitaine en tant que système complexe ? Qu'est-ce que cela change lorsqu'on le fait ? (Chapitre 2).

Quelles sont les spécificités de la ville en tant que système complexe ? Quel rôle y joue la forme physique de la ville ? Comment mettre en relation formes et fonctionnements ? (Chapitre 3).

Quelles méthodes peuvent être mobilisées pour appréhender l'incertitude des connaissances sur la ville ? Quelle est la portée de l'hybridation avec les démarches de l'intelligence artificielle ? (Chapitre 4).

2. La complexité des villes et des aires métropolitaines pour le géographe et l'urbaniste

2.1 La ville non complexe

La ville, un système qui peut être contrôlé en se focalisant sur ses fonctions

L'aménagement des régions urbaines et métropolitaines, tout comme les plans d'urbanisme à l'échelle de chaque ville, ont, au cours du XX^e siècle, fait référence à des paradigmes interprétatifs et opérationnels particulièrement mal-adaptés aux réalités urbaines qu'ils avaient à gérer¹. À être un peu provocateur, on pourrait dire que l'aménagement et l'urbanisme ont fait fausse route. Mais la responsabilité de cette fausse route est à la fois dans la culture pratique de ces métiers, dans le contexte sociétal où les interventions sur la ville trouvent leur justification politique et dans les lieux d'élaboration des théories qui apportent une justification rationnelle et scientifique aux plans élaborés. Or ces théories, venant essentiellement de l'économie spatiale et de la géographie urbaine, sont des théories hyper-simplificatrices du réel, qui n'acceptent pas la complexité urbaine comme une caractéristique positive, au sens épistémologique du terme. Parmi ces théories classiques de l'organisation spatiale de la ville on peut citer la théorie des lieux centraux (Christaller 1933, Lösch 1940), la théorie de l'accessibilité gravitaire comme base de l'organisation des réseaux et de l'interaction spatiale dans la ville (Reilly 1931, Isard 1956), l'approche fonctionnaliste de l'architecture et de l'urbanisme (Loos 1908, Le Corbusier 1924), l'aménagement urbain par zonage réglementaire (Le Corbusier 1943).

On aurait néanmoins tort de considérer ces théories comme figées dans l'état où elles ont été formulées au cours de la première moitié du XX^e siècle. Les toute naissantes science de la complexité (Weaver 1948) et cybernétique (Wiener 1948) interpellent les théories de l'urbain. Dans les années 50 et '60 les théories de l'organisation spatiale urbaine ont ainsi été intégrées dans une approche systémique et cybernétique de l'espace géographique. Les éléments clés des systèmes spatiaux sont identifiés, les relations qui les régissent sont déterminées, des boucles d'interactions sont étudiées, des interventions externes de la part des décideurs sont introduites. Implémentés dans des modèles quantitatifs appropriés, ces principes permettent de fonder une démarche « rationnelle et exhaustive » de l'aménagement urbain (*rational comprehensive planning* dans la littérature en langue anglaise, Taylor 1998). L'approche systémique introduit un premier niveau de complexité aux fonctionnements urbains, mais en réalité cette complexité semble complètement maîtrisable par les analystes : la « machine » spatiale est décomposée, les lois régissant ses fonctionnements sont connues, des « contrôles » sont introduits. Le géographe et l'aménageur semblent avoir la même maîtrise de la machine spatiale que l'ingénieur a d'un système électronique. Au plus, on peut mesurer du bruit (toujours inévitable dans les sciences observationnelles) écartant les espaces réels des modèles théoriques, en conséquence des innombrables spécificités locales qui perturbent, à la marge, le fonctionnement général, pourtant calibré sur la ville en question.

¹ C'est une critique qui, de points de vue très différents, peut être retrouvée dans Jacobs (1961), Alexander (1965), Portugali (2000), Salingeros (2005), Talen (2012), etc.

D'importants travaux théoriques viennent résumer cette nouvelle façon de concevoir l'aménagement des espaces urbains : McLaughlin (1969), Chadwick (1971), Faludi (1973). Ces auteurs voient l'aménagement comme un processus de prise de décision rationnel dans lequel les aménageurs peuvent fournir aux décideurs une évaluation objective des conséquences des différentes options d'aménagement sur le système urbain. Aux décideurs de poser les objectifs, les aménageurs se chargeront de concevoir la bonne organisation spatio-fonctionnelle susceptible d'atteindre ces objectifs, tout en laissant les décideurs arbitrer entre un certain nombre d'options possibles. Bien évidemment, une fois le plan arrêté, les aménageurs se chargeront également de son suivi, pour vérifier que les actions implémentées sont en train de produire les effets escomptés, quitte à renforcer les interventions/contrôles lorsque le système spatial semble s'éloigner de la trajectoire prévue dans le plan. Sur ces bases, Faludi (1986) peut ainsi proposer de dépasser les rigidités des plans de zonages traditionnels, où les affectations des sols sont définies une fois pour toutes : sans renier l'approche du zonage, ce dernier doit être élaboré de façon flexible et itérative, car l'aménageur doit pouvoir disposer d'une certaine marge de manœuvre pour assurer un contrôle optimal du système urbain.

Cette approche de l'aménagement des espaces urbains repose crucialement sur la capacité de modèles de prévisions à identifier les conséquences de toute intervention sur l'espace géographique. Les théories subjacentes à ces modèles, laissant peu de place à l'auto-organisation urbaine et aux aspects mal connus des fonctionnements de la ville, semblent rendre cet objectif réalisable. Par ailleurs, **la complexité de la forme urbaine est complètement évacuée par les modèles proposés, les relations spatiales dans la ville se limitant à des interactions soumises à un effet dissuasif de la distance, selon une vision très marquée par l'économie spatiale** de W. Isard (1956) et W. Alonso (1964).

Dans la communauté des modélisateurs, Lee (1973) est le premier à identifier l'impossibilité (parfois théorique, parfois seulement technique et pratique) de développer des modèles urbains omni-compréhensifs à la hauteur des attentes de connaissance de l'aménagement rationnel et exhaustif. Ce qui est en tous cas commun aux théories et aux modèles de cette époque est la focalisation sur l'usage des sols et sur les distances et le fait d'avoir évacué la question de la forme urbaine. Celle-ci est vue comme une question d'échelle plus fine, n'ayant pas d'impact sur l'organisation d'ensemble d'une aire urbaine, et laissée aux urbanistes travaillant sur la composition urbaine.

Les formes physiques sont codifiées par des visions idéologiques sur la ville

Or, en ce qui concerne la composition urbaine², la situation est encore plus paradoxale : l'urbanisme moderne, celui des Congrès Internationaux d'Architecture Moderne (CIAM 1928-1959) et de la Charte d'Athènes (Le Corbusier 1943) est basé sur une vision idéologique de type scientifique, en dépit des nombreuses références à la méthode scientifique. La détermination de standards de qualité pour la production de bâtiments est certainement le produit de calculs rationnels sur les besoins des usagers, mais la justification des formes architecturales et urbaines adoptées se sert souvent d'arguments pseudo-scientifiques. Je suis volontiers Salingaros (2005, p. 13) : « L'abus de l'appellation scientifique par les urbanistes modernes doit être clarifié. On lit sur les manuels d'architecture comment le modernisme est basé sur la logique et la méthode scientifique, mais il s'agit d'un mensonge délibéré. Dans les faits, le modernisme ne se soumet pas à une investigation scientifique et impose des idées arbitraires d'en haut (...). Les pères fondateurs du modernisme avaient seulement une compréhension sommaire des idées scientifiques du dix-neuvième siècle, dont ils faisaient une utilisation abusive pour

² J'emploie le terme de composition urbaine pour rendre en français les notions de *Urban Design* et de *Städtebau*, c'est-à-dire la branche de l'urbanisme qui s'attache à la conception des formes physiques de la ville.

étayer leurs visions urbaines destructrices [on dirait disruptives dans le jargon actuel, n.d.t.]. Ils ne comprenaient même pas la science de leur temps, tout en ayant imaginé et exploité une connexion avec la théorie de la relativité pour son pouvoir évocateur en termes de propagande »³.

On retrouve la même critique dans Jacobs (1961). L'essayiste américaine souligne cependant que même la réponse culturaliste au mouvement moderne, hégémonisé en contexte anglophone par le mouvement des cités jardins (Howard 1902, Unwin 1909), se fonde essentiellement sur une approche idéologique, réfractaire à toute vérification scientifique. De surcroît, il s'agit d'une idéologie profondément anti-urbaine, qui fait abstraction de la compréhension des fonctionnements des grandes villes contemporaines et des liens subtils qui les lient à sa forme physique.

Pour Jacobs, l'urbanisme moderne du CIAM réduit la ville à un problème de complexité non organisée. La ville est une multitude d'habitants, d'entreprises, de flux, etc. qui n'ont pas d'ordre propre, le problème de l'urbanisme consiste à organiser ces multitudes désorganisées pour leur donner une cohérence spatiale et fonctionnelle : l'ordre est imposé par la démarche exogène de l'urbaniste, la ville abandonnée aux appétits des individus et des promoteurs ne peut que déboucher sur le chaos. Les paradigmes de la mécanique statistique et de la thermodynamique sont appropriés à traiter ce type de problèmes : calculer des statistiques des comportements moyens et agrégés des individus, axer la programmation des besoins en logements, infrastructures, zones d'activités par la prévision de ces valeurs moyennes et agrégées, tout en simplifiant le problème par un zonage fonctionnel rationalisateur. En matière de composition urbaine le mouvement moderne poursuit un agenda bien précis : destruction des tissus urbains traditionnels, récusation des règles d'alignement et de mitoyenneté qui caractérisent l'îlot de la ville prémoderne et même théorisation d'une ville sans îlots, où les bâtiments (aux nouvelles formes qui sont la tour et la barre, véritables « machines à habiter ») sont disséminés dans un espace vide végétalisé ; aux rues avec leurs trottoirs se substituent des autoroutes urbaines permettant d'introduire l'automobile dans la ville (Panerai et al. 1997). On cherchera en vain des études permettant d'évaluer *a posteriori* la meilleure performance urbaine de ces nouvelles formes.

L'anti-urbanisme des cité jardins nie la dimension même de la ville contemporaine et de la métropole : tout en étant attentif aux héritages vernaculaires en matière de typologies architecturales, les modèles de composition urbaine poursuivis sont ceux du village traditionnel et de la toute petite ville auto-suffisante. Le programme pour la composition urbaine est encore une fois précisément arrêté : réseau relativement peu connectif de rues sinueuses et arborées, desservant des lotissements de maisons individuelles au style vernaculaire et évitant tout flux de passage devant les maisons. Le problème du développement urbain est résolu dans la mesure où il est nié : la taille idéale de la ville est de 32 000 habitants (Howard 1902), unité de base devant vivre en équilibre avec les ressources agricoles et naturelles environnantes et devant auto-contenir les besoins d'emploi, de services et de consommation de ses habitants. Une fois postulées l'optimalité et la faisabilité de ce modèle, le problème de l'urbaniste devient un simple problème à deux-trois variables : calculer les emplois et les services nécessaires à l'autosuffisance de la population de la petite ville et les localiser selon des schémas-type faisant la part belle à la tranquillité résidentielle du tissu pavillonnaire villageois. En schématisant, les services hautement symboliques seront localisés autour de la place du village, les pavillons dans le tissu environnant et les activités artisanales et de petite industrie aux abords du village, en contact direct avec l'espace rural. Toute possibilité de développement autonome de la ville est niée, toute capacité d'adaptation et d'auto-organisation des formes et des fonctionnements de la ville est exclue, et surtout la croissance doit être strictement contenue dans les limites quantitatives

³ Ma traduction.

du projet fondateur pour éviter que la petite ville échappe au contrôle strict qui lui est imposé. Ce projet réactionnaire ne pouvait clairement pas organiser l'urbanisation et la métropolisation croissante du XX^e siècle avec des nouvelles conurbations plusieurs fois millionnaires. La première génération de véritables cités jardins (Letchworth et Welwyn en Angleterre) a ainsi été suivie, dans l'après-guerre, par la réalisation de villes nouvelles satellites de Londres ou par les nouveaux développements pavillonnaires périurbains à l'apparence villageoise tout en étant compatible avec l'arrivée de l'automobile, comme le projet paradigmatique de Radburn au New Jersey. La cité jardin autosuffisante se transforme dans un quartier dortoir dépendant en tout de la grande métropole, qu'elle souhaitait contrecarrer.

Finalement, constate Jacobs (1961), la pratique urbanistique de l'après-guerre est un mélange pragmatique des solutions du mouvement moderne (pour les centres des affaires, les campus universitaires, les cités de logements sociaux, etc.) et d'adaptation de la cité jardin (lotissements périurbains, quelques villes nouvelles, etc.), éventuellement joutés par des interventions sur la ville consolidée selon les préceptes du « *city beautiful* ». Ce dernier est un mouvement qui avait déjà fleuri aux Etats-Unis à partir de la fin du XIX^e siècle faisant la part belle aux projets des grands architectes dans une vision relativement naïve selon laquelle les grandes architectures fondent l'urbanisme de la ville : il suffit de rassembler des bâtiments extraordinaires pour créer des nouvelles centralités urbaines, surtout dans une vision de marketing métropolitain international.

En conclusion, **les théories qui régissent l'aménagement urbain à l'échelle régionale évacuent les questions de la forme et se focalisent sur la localisation des activités, les théories urbanistiques imposent des formes dans la composition urbaine sans aucune évaluation scientifique des solutions proposées. Les unes et les autres nient le caractère complexe et auto-organisé de la ville et postulent la nécessité de lui imposer un ordre externe**, relativement simple. Pour compléter ce cadre, je rajouterai seulement que **l'ensemble de ces approches postulent une connaissance suffisamment certaine de la ville**, de ses fonctionnements actuels et de son évolution future, pour pouvoir arrêter des plans et des programmes d'intervention qui ne laissent **aucune place aux questions d'incertitude**, un point de vue partagé par Marshall (2012).

2.2 La complexité urbaine

Des nouvelles approches, plus holistiques et attentives aux questions de forme

Ces théories et ces modèles ont été successivement rejetés par des approches plus holistiques et attentives aux questions de forme, mais ignorant la modélisation quantitative. Dans son ouvrage fondateur, « *Life and Death of Great American Cities* », Jane Jacobs (1961) décrit avec beaucoup de subtilité, mais de façon uniquement textuelle, la complexité auto-organisée constatée dans le fonctionnement des espaces publics et des interactions humaines dans les grandes villes américaines. L'ordre complexe des fonctionnements et des morphologies sociales et fonctionnelles se forme spontanément et graduellement au cours du temps. Pour Jacobs la ville pose de problèmes de complexité organisée, proche à celle d'un organisme vivant, dans lesquels une demi-douzaine ou même plusieurs douzaines de variables varient toutes simultanément par le jeu d'interconnexions subtiles.

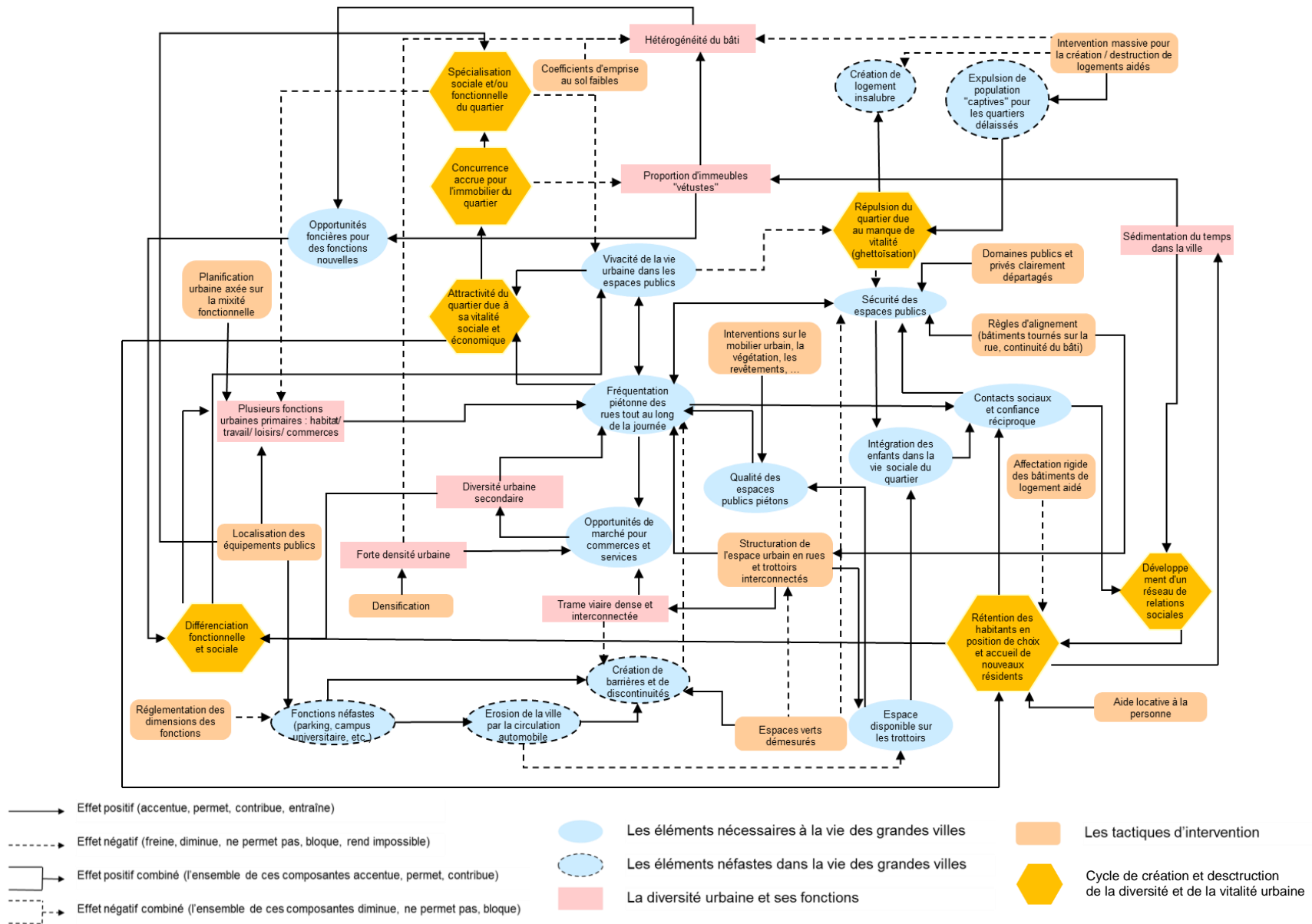


Figure 2.1 - Le fonctionnement de la grande ville américaine selon J. Jacobs.

Les villes, continue Jacobs, ne posent pas un seul problème de complexité organisé qui, une fois résolu permet de tout expliquer (soit-il l'accessibilité aux emplois, la question du logement, le financement du renouvellement urbain ou le problème du trafic automobile). Plusieurs de ces problèmes s'enchevêtrent. J'avais produit il y a quelques années un schéma qualitatif représentant la vision systémique du fonctionnement de la grande ville américaine selon Jacobs (Figure 2.1), que je laisse à l'appréciation de mes lecteurs, surtout s'ils ont déjà eu l'occasion de lire l'ouvrage original.

Les analyses de Jacobs restent qualitatives, mais son ouvrage est riche de considérations opérationnelles, allant de la disposition des bâtiments le long des rues, à la conception des parcs et des jardins, de la forme des réseaux viaires à la mixité fonctionnelle et à la gestion de la densité urbaine, jusqu'à esquisser un possible cycle de gentrification et de paupérisation (qu'elle appelle processus de création et de destruction de la diversité et de la vitalité urbaine), observable pour les quartiers qui possèdent un certain nombre de propriétés morphologiques.

Une autre puissante critique aux schémas de l'urbanisme et de l'aménagement moderne et aux modèles théoriques qui les sous-tendent vient de l'architecte et urbaniste Christopher Alexander. Dans son article fondateur, « *The city is not a tree* » (1965), Alexander réintroduit l'attention à la complexité de la forme urbaine dans une approche plus holistique. Il identifie la relation existant entre formes urbaines et fonctionnements de la ville à partir de la modélisation permise par la théorie des ensembles. Plus précisément, Alexander attaque la conception de la ville comme un système hiérarchique quasi-décomposable d'unités de base (quartiers résidentiels avec services de base, quartiers d'activité, centres de services de portée urbaine, etc.) que l'on assemblerait par emboîtement successifs. Cette vision très technocratique, courante dans la pratique de l'aménagement urbain moderne, contredit les fonctionnements auto-organisés de la ville. Si les relations fonctionnelles de la ville planifiés selon ces principes peuvent se réduire à la topologie d'un arbre, celle de la ville auto-organisée est plutôt un demi treillis, non réductible à une hiérarchie parfaite d'éléments emboîtés, car des nombreux enchevêtrements existent entre les centralités créées par chaque fonction urbaine. Or, à différentes échelles, les plans des cités jardin (comme Columbia et Greenbelt), ceux des grandes villes nouvelles (Brasilia de Lucio Costa, Chandigarh de Le Corbusier) et ceux pour l'aménagement des grandes aires métropolitaines existantes (le *Greater London Plan* de Forshaw et Abercrombie, 1943) imposent inexorablement une organisation hiérarchique emboîtée à la topologie arborescente.

Un point permet de faire converger les critiques de Jacobs et d'Alexander : l'approche rationnelle et exhaustive qui sous-tend l'urbanisme et l'aménagement modernes, a implémenté une rationalité qui n'est pas celle observable par l'analyse des fonctionnements réels de la ville. Ces derniers sont beaucoup plus complexes, souvent auto-organisés et possèdent des relations subtiles avec les formes urbaines.

Les visions holistiques proposées par Jacobs et Alexander ont souvent porté à une lecture « organiciste » de la complexité urbaine : la ville serait plus proche d'un organisme vivant que d'une machine, une suggestion proposée en parallèle par le courant architectural de la typo-morphologie urbaine (Caniggia et Maffei 1979, voir Chapitre 3). Marshall (2012) nous propose alors une différenciation beaucoup plus subtile des types de complexité organisée, comme combinaisons de deux dimensions différentes (Tableau 2.1) : l'origine (naturelle/artificielle) et la possibilité ou non de faire coïncider le système avec un objet bien délimité. Il identifie également des principes de connaissabilité pour les différents types.

2. La complexité des villes et des aires métropolitaines

Origine : Délimitation :	Artificielle	Naturelle
Objet délimité	Complexité artefactuelle <i>machine, bâtiment, œuvre d'art</i>	Complexité biologique <i>organisme</i>
Système non délimité	Complexité de systèmes d'artefacts <i>système légal, Internet, ville, système urbain</i>	Complexité écologique <i>écosystème</i>

Tableau 2.1 – Différents types de complexité organisée (élaboration depuis Marshall 2012).

La complexité artefactuelle est celle d'un objet, un système bien délimité, conçu par l'humain : pour une machine, un bâtiment, un œuvre d'art, un concepteur crée un ordre et positionne chaque composante du système selon cet ordre préétabli pour atteindre des finalités recherchées (fonctionnelles, esthétiques, etc.). L'organisation est portée de l'extérieur et le système est, de ce fait, parfaitement connaissable.

L'organisation des systèmes naturels est toujours une auto-organisation : elle émerge, avec une histoire, des dynamiques internes au système en interaction avec un environnement (l'auto-éco-organisation de Morin). On peut néanmoins différencier deux types de complexité dans ces systèmes (on se limitera ici aux systèmes naturels vivants). La première est la complexité que Marshall appelle biologique, celle de l'organisme vivant pris individuellement. Le système est un objet clairement délimité, poursuivant des objectifs (survie et reproduction), suivant un programme (des stades de développement définis par son code génétique), tout en s'adaptant à un environnement. La connaissance de son organisation n'est pas évidente (beaucoup de mécanismes derrière les formes observées restent inconnus à la biologie), mais elle est généralement connaissable dans la mesure où elle reste au sein d'un programme préétabli (l'organisme tend à l'homéostasie, c'est-à-dire à un fonctionnement stable en dépit des variations de l'environnement). La complexité d'un écosystème est celle d'un ensemble de communautés d'organismes, en interaction entre elles et avec les composantes abiotiques de l'environnement. Le système est extrêmement ouvert, dans le sens qu'il est essentiellement non délimité (dans un continuum, chaque écosystème est part de la biosphère et poser des limites spatio-fonctionnels stricts à un écosystème ne va pas de soi), ne poursuit pas des objectifs et n'a pas de programme. Des nouvelles composantes peuvent s'ajouter, d'autres peuvent disparaître. Le système s'adapte en trouvant une nouvelle organisation. Ces mêmes caractéristiques rendent l'organisation du système plus difficilement connaissable : difficultés dans la délimitation opérationnelle du système, imprédictibilité des nouveaux fonctionnements, etc.

Nous venons ainsi au dernier type de complexité organisée, celle des systèmes d'artefacts. Les composantes du système sont individuellement conçues et produites par l'humain, mais aucun concepteur, ni individuel, ni collectif, n'est capable de fournir un programme d'ensemble pour le système. De ce point de vue, l'organisation émerge, éventuellement au sein d'une dialectique entre auto-organisation et tentatives de contrôle, même partiel, par l'humain. Comme les écosystèmes, le système est ouvert, ne possède pas d'objectifs clairs à poursuivre, et l'apparition/disparition de composantes et de relations amène à une redéfinition adaptative de l'auto-organisation. Un système légal, Internet, une langue naturelle, un système économique, montrent précisément ce type de complexité organisée. En ce qui nous concerne, la ville, tout comme un système urbain régional ou national, sont aussi caractérisés par la complexité auto-organisée des systèmes d'artefacts. Aux problèmes de connaissances de la complexité écosystémique se rajoute le problème des incertitudes des conséquences des interventions sur le système.

En réalité, Jacobs (1961) souligne que la ville n'est pas un organisme vivant, et que l'organisation de ce dernier fournit seulement une analogie utile. L'argument de Marshall est alors que, si une analogie doit être trouvée avec les sciences du vivant, elle doit s'établir davantage avec l'écosystème, ouvert, non téléologique et adaptatif, qu'avec l'organisme. Il reconnaît néanmoins que les ouvrages successifs de Jacobs (1970, 2000) utilisent cette analogie écosystémique. Dans ce qui suit, nous allons voir dans quelle mesure cette prise de conscience de la complexité urbaine a pu s'enrichir d'approches computationnelles.

La maturation de théories computationnelles pour la complexité urbaine

Rabino et Scarlatti (2009) soulignent comment l'ordinateur et, plus en général les NTIC, qui avaient permis jusqu'aux années 80 d'implémenter de façon plus rapide et efficace les algorithmes de calcul des modèles classiques, ont successivement permis de bâtir de nouvelles théories computationnelles de la ville en tant que système complexe auto-éco-organisé.

Une première grande direction de recherche concerne les **approches computationnelles à la modélisation des dynamiques de l'émergence de la complexité urbaine**. La focale est sur la complexité agrégée, sur les dynamiques permettant de faire émerger des *patterns* urbains à partir de la multitude d'interactions entre éléments. La question de fond est la suivante : sommes-nous capables de reproduire l'émergence de *patterns*, proto-structures, par le jeu de ces interactions ? À différentes questions correspondent différentes échelles et souvent différentes techniques de modélisation : dans les modèles de ségrégation urbaine (depuis celui classique de Schelling 1971) il s'agit de l'interactions entre individus/ménages et les *patterns* sont des sous-espaces urbains plus ou moins ségrégués ; dans le modèle Simpop (Sanders et al. 1997) l'interaction est celle entre les éléments d'un semis urbain sur un espace national ou macro-régional et le *pattern* émergent est la hiérarchie et la spécialisation fonctionnelle entre ces villes. Les structures émergentes sont relativement simples, l'effort de recherche est sur les dynamiques de l'émergence. Je ne pourrai qu'esquisser rapidement quelques jalons des recherches ayant contribué à ce long cheminement scientifique, remontant aussi à des travaux précédents, mais sans aucune prétention d'exhaustivité.

L'œuvre d'Alan Wilson « *Urban and regional models in geography and planning* » (1974) représente bien la transition entre les paradigmes des modèles classiques et l'approche des systèmes complexes. Cet ouvrage est une systématisation des modèles urbains et régionaux produits par l'approche rationnelle et exhaustive, des modèles essentiellement statiques (ou éventuellement aux différences) basés sur l'identification de solutions d'équilibre, selon l'approche classique de l'économie spatiale d'Isard et Alonso. Ces modèles seront raffinés par Wilson par l'introduction des techniques à base d'entropie dans l'estimation des paramètres de l'interaction spatiale. Wilson reconnaît qu'il s'agit de techniques aptes à décrire la complexité désorganisée plus que celle auto-organisée de la ville mais, après tout, la théorie « forte » des modèles gravitaires étant acceptée en tant qu'organisatrice de la spatialité des fonctions urbaines, l'approche de la maximisation de l'entropie revient à imposer les contraintes microscopiques les plus faibles possibles à cette organisation.

Après l'ouvrage fondateur de Forrester (1969), l'approche des systèmes dynamiques d'équations différentielles féconde la modélisation urbaine au tournant des années 70 et 80. Pumain (1998) identifie deux grandes familles de recherches dans cette direction. La première est celle des modèles analytiques de la croissance urbaine, où le couplage de dynamiques non-linéaires entre les variables urbaines permet d'étudier l'émergence de familles de trajectoires différenciées, définissant des régimes dynamiques caractérisés par la présence d'attracteurs différents. Au début des années 80, Wilson explore ainsi les implications morphogénétiques de la théorie des catastrophes de René Thom

sur les systèmes urbains (Wilson 1981), mais il n'en ressort pas des modèles opératoires pour l'aménagement urbain. Les modèles écologiques de type Lotka-Volterra et ceux à base d'équations maîtresses dérivées de la théorie de la synergetique d'Haken (1978) sont également étudiés. L'approche synergetique produit un résumé probabiliste de l'ensemble des trajectoires possibles d'unités élémentaires dans leurs transitions d'état, permettant de parvenir à des équations déterministes liant les valeurs moyennes de ces entités élémentaires, et par là les transitions des états macroscopiques du système. Weidlich et Haag (1988) modélisent ainsi le système des migrations interrégionales. Dans « Système de villes et synergetique », Lena Sanders (1992) travaille à l'échelle d'un système de villes.

En synergetique, les dynamiques macroscopiques sont ainsi dérivées des probabilités des mobilités définies à un niveau micro. L'analogie avec les démarches de la thermodynamique et de la mécanique statistique est évidente, mais ces approches permettent de faire sortir l'organisation des systèmes de villes des postulats de l'équilibre économique qui avaient fondé les modèles de Christaller (1933) et de Lösch (1940) pour les situer dans celui de la science de la complexité. Pumain (1998) observe néanmoins que le passage micro-macro, établi au niveau théorique, est grandement simplifié dans les implémentations computationnelles, qui travaillent essentiellement avec le niveau agrégé des variables d'état du système.

Une seconde famille de modèles dynamiques de systèmes d'équations différentielles sont ceux qui modélisent l'émergence des structures urbaines, c'est-à-dire des *patterns* de localisation d'activités, de populations et de services à l'échelle intra-urbaine (la ville étant préalablement tessellée par un zonage administratif ou fonctionnel). À propos de ces structures, Pumain (1998) parle même de « formes », un concept que je développerai dans bien plus de détail dans la Section 3.1.

Les modèles de Wilson (Harris et Wilson 1978, Clarke et Wilson 1985), introduisent toujours l'hypothèse que l'on puisse trouver quelques situations d'équilibre dans les dynamiques non-linéaires de la localisation des fonctions urbaines dans l'espace, permettant ensuite d'identifier des patterns de flux de navetteurs maximisant l'entropie. « *Complex Spatial Systems* » (Wilson 2000), tout en faisant une référence explicite à la théorie des systèmes complexes, est une systématisation ultérieure de la modélisation urbaine classique : les modèles se « complexifient » dans le sens d'augmenter le nombre de paramètres et la finesse des méthodes d'estimation des paramètres, les imperfections des marchés peuvent être introduites dans les modèles, les usages des sols peuvent être couplés aux modèles de transport, les approches entropiques justifient théoriquement et opérationnalisent l'estimation des paramètres, les zonages considérés peuvent être plus fins qu'auparavant et les critiques de Lee ont pu être rejetées par la contre-analyse de Klosterman (1994), intégrant les plus récentes avancées de la modélisation urbaine et la plus grande disponibilité de données. Mais la focale est toujours celle de l'aménagement de l'après-guerre : prédire et contrôler l'usage des sols, l'allocation de ressources et les interactions spatiales. Wilson identifie des nouveaux défis pour la modélisation (la micro-simulation toute naissante, l'enjeu de pouvoir « prédire » les changements structurels des systèmes spatiaux, etc.), mais le message sous-jacent à son ouvrage semble être le suivant : les nouveaux modèles, plus sophistiqués des modèles des années 60 et 70 et bénéficiant d'une puissance de calcul informatique supérieure, donnent l'impression de pouvoir encore répondre aux besoins de connaissance du *rational comprehensive planning*.

Les modèles d'Allen et Sanglier (1979) et de Pumain et al. (1989) ne partent pas de l'identification des états d'équilibre dans les dynamiques non linéaires. L'objectif de ces modèles est précisément d'explorer avec une plus grande liberté les bifurcations possibles à long terme dans les dynamiques et l'organisation interne de la ville. L'ouvrage successif de Peter Allen « *Cities and Regions as Self-*

Organizing Systems: Models of Complexity » (1997) systématise ces résultats et souligne le rôle des relations entre le niveau microscopique des agents individuels et celui macroscopique des structures urbaines résultantes, qui créent les contraintes en termes de coûts et de bénéfices pour les décisions individuelles. Allen propose un débouché pratique à ces modèles d'auto-organisation dynamique en termes d'aide à la décision. Mais, dans l'impossibilité de prévoir l'évolution future des systèmes urbains, il suggère de les employer pour explorer des évolutions possibles, sous le jeu de multiples hypothèses, permettant d'avoir une vision qualitative de la robustesse de certaines hypothèses d'aménagement.

Globalement, dès le milieu des années 1990, on reconnaît la centralité des approches de la complexité (et en particulier de la complexité computationnelle) dans les quatre grandes disciplines de la ville : la géographie, l'urbanisme/aménagement, l'économie et la sociologie, comme témoigné par le séminaire international sur la ville et ses sciences, organisé à Pérouse en 1996 par l'Association Italienne de Science Régionale (Bertuglia et al. 1998). Au cours des années 90, la modélisation des dynamiques de l'émergence de la complexité urbaine dépasse le seul cadre des modèles à base d'équations différentielles. Les nouvelles techniques de la géocomputation (les automates cellulaires et les systèmes multi-agents) se posent comme une alternative particulièrement intéressante à la simulation de la complexité urbaine. On peut ainsi implémenter des règles d'interaction entre des agents élémentaires (éléments surfaciques, ménages, agents économiques) et étudier le rapport avec les formes émergentes au niveau macroscopique de façon beaucoup plus souple que par un jeu d'équation différentiels. L'ordinateur ne sert alors plus pour trouver une solution numérique à un problème analytique, mais pour formuler un modèle différent de la ville, un modèle algorithmique qui n'implique pas le passage par des équations analytiques.

Juval Portugali (2000) est le premier à explorer de façon cohérente le potentiel des nouvelles techniques de géocomputation pour reproduire les formes émergentes de la ville (macro-forme, organisation fonctionnelle, ségrégation socio-spatiale en déclinant sur des espaces urbains réels l'approche de Schelling, diffusion de l'innovation, etc.). Une importante direction de recherche en modélisation urbaine a ainsi pu s'établir (Torrens 2002, Benenson et Torrens 2004, Portugali et al. 2012), avec les mises-en-garde épistémologiques que j'ai présentées dans la Section 1.3 (O'Sullivan 2004). L'exploration de l'espace des paramètres des modèles de géosimulation a également émergé comme un enjeu scientifique, qui a récemment trouvé une solution dans l'emploi du calcul intensif (Pumain et Reuillon 2017).

Je n'irai pas plus loin dans la présentation des approches de géosimulation de la complexité agrégée car elles ne constituent pas l'essentiel de mes recherches sur les espaces urbains, avec quelques exceptions. J'ai notamment proposé une modélisation multi-agent de l'interaction entre pressions urbaines et économie viticole dans le vignoble de Bandol (Fusco et Caglioni 2014), dans le périurbain toulonnais. Et je participe actuellement à un groupe de recherche interdisciplinaire pour introduire la perception et la cognition des agents urbains, en géosimulation, selon un cadre *Belief-Desires-Intentions* en contexte d'incertitude (Vanegas et al. 2017). Ces recherches m'ont permis de mieux saisir les spécificités et le potentiel des modélisations à base d'agents, mais ne seront pas mises à contribution de cet essai.

Une seconde grande direction de recherche quantitative sur la complexité urbaine, sont les **approches computationnelles à la complexité structurelle de la ville**. La focale est ici sur l'analyse de la complexité structurelle, on ne simule pas l'émergence des structures mais on étudie leur enchevêtrement et leur spatialité (niveaux d'organisation, réseaux fonctionnels, formes physiques), éventuellement on simule les fonctionnements liés à ces structures. La forme spatiale (physique,

fonctionnelle) est identifiée à la fois comme marqueur et comme facteur des fonctionnements complexes de la ville. Les analyses sont normalement intra-urbaines, souvent multi-scalaires, parfois trans-scalaires, comme dans les recherches sur la fractalité de la ville (Batty et Longley 1994, Batty et Xie 1996, Frankhauser 1994) et abordent rarement les systèmes urbains régionaux ou nationaux. Les approches réticulaires participent également des recherches sur la complexité structurelle de la ville. Les géographes et urbanistes travaillant dans cette direction (Porta et al. 2006a, 2006b, 2010) nouent également des liens importants avec la communauté des réseaux complexes, qui avait déjà fécondé les recherches de la sociologie structurelle (Freeman 1977, 1979). Certains auteurs (Hillier et Hanson 1984, Hillier 1996, Salingaros 2005) aboutissent à des théories morphologiques de la complexité urbaine qui renouvellent la recherche sur les relations forme-fonctionnement et ouvrent même sur la morphogénèse de la complexité structurelle de la ville. Ces théories seront plus particulièrement présentées dans le cadre du Chapitre 3, où il sera question de forme urbaine et de relations forme-fonctionnement.

L'ensemble de l'œuvre de Michael Batty, et plus particulièrement, ses deux ouvrages « *Cities and Complexity* » (2005) et « *A new Science of Cities* » (2013) constituent un trait d'union très puissant entre les approches pré-complexes à l'analyse des systèmes urbains, les théories morphologiques de la complexité structurelle urbaine et les approches géocomputationnelles de simulation des dynamiques d'émergence de la complexité agrégée. Plus particulièrement, Batty fait le lien entre les formes fractales et les résultats des modèles de géosimulation par automates cellulaires ou par modèles multi-agents. Par ailleurs, Batty souligne que l'objectif des modèles de géosimulation est davantage la compréhension des dynamiques urbaines qu'un quelconque pouvoir prédictif dans l'aide à la décision dans l'aménagement urbain. L'émergence se soustrait à la calibration et les modèles que l'on peut produire ne peuvent alors qu'apporter des connaissances qualitatives des dynamiques urbaines possibles.

Une dernière dimension de la complexité urbaine doit encore ici être brièvement mentionnée, même si elle a été relativement moins investie par les approches computationnelles. Il s'agit de **la complexité liée aux acteurs de la ville**. Rabino (2005) tout comme Blečić et Cecchini (2016) soulignent que les systèmes socio-spatiaux qui sont les villes sont des systèmes doublement complexes : à la complexité agrégée et structurelle, se rajoute la complexité de sujets (individus, ménages, entreprises, groupes sociaux) qui ont une perception de l'espace urbain, ont des objectifs et des stratégies, et modifient ces derniers par rapport à la perception des objectifs et des stratégies des autres. Une importante littérature, en géographie, en aménagement, en sociologie et en sciences politiques, aborde qualitativement la complexité liée à la gouvernance et aux stratégies des acteurs urbains (par exemple Healey 2006 ou Innes et Boher 2010). Les approches computationnelles sont également possibles : de la théorie des jeux (Thisse 2002) qui reste néanmoins souvent a-spatiale, à l'introduction des perceptions et des stratégies dans les modèles de géosimulation (Taillandier et al. 2016). Les perceptions sociales et les stratégies d'acteurs constituent pourtant des questions fondamentales dans la fabrication de la ville, tout comme dans la réussite ou dans l'échec des plans et des politiques de l'aménagement urbain. « *Complexity Theories of Cities Have Come of Age* » (Portugali et al. 2012) est le titre emblématique d'un séminaire international organisé à Delft, qui résume bien l'état d'avancement des théories de la complexité pour la ville et couvre les différentes directions de recherche ici esquissées : complexité dynamique (désormais essentiellement en termes de géosimulation), complexité structurelle et complexité dans la gouvernance, avec des ouvertures vers la complexité cognitive des acteurs.

2.3 Le problème des concepts et des points de vue pour appréhender la ville

Des concepts polysémiques et polymorphes pour la ville complexe

Une donnée incontournable pour les sciences sociales est la pluralité des connaissances possibles sur un même objet d'étude. En raison de la diversité des regards portés par différentes disciplines et par différentes traditions de recherche au sein de chaque discipline, des conceptualisations, des protocoles d'analyse et des paradigmes interprétatifs différents peuvent en effet coexister sur un même objet d'étude. **Morin relie la pluralité des connaissances à la complexité des objets d'étude des sciences sociales. Les différentes disciplines et traditions de recherche ne sont que des fentes d'observation particulières pour ces réalités complexes.** Elles ne peuvent qu'aboutir à des visions partielles des systèmes étudiés, la compréhension de l'organisation et du fonctionnement du système dans son ensemble étant liée à un effort d'interdisciplinarité qui est tant nécessaire que difficile à mettre en place. Pour Morin, un système complexe est toujours régi par une pluralité de principes d'organisation, qui sont souvent même en relation de dialogie (donc en contradiction apparente). La pluralité des connaissances est souvent la pluralité de théories qui privilégient l'entrée d'un seul principe d'organisation. Il en résulte ensuite un effort épistémique considérable pour essayer de recomposer le cadre de connaissance sur le système étudié, un effort qui ne peut pas faire l'économie d'une remise en discussion des présupposés qui donnaient à chaque cadre théorique son semblant de certitude.

Dans sa hiérarchie des sciences, Anderson (1972) observe comment les sciences naturelles déterminent leurs objets d'étude sur des échelles spatio-temporelles emboîtées : la physique des particules s'intéresse au monde subatomique, la physique des états condensés et la chimie aux atomes et aux molécules, la biochimie aux macromolécules organiques, la biologie aux cellules et aux tissus, la physiologie animale et végétale aux organes et aux organismes, l'écologie aux populations d'espèces vivantes, etc. Anderson suggère que chaque discipline aborde la complexité des principes d'organisation de l'échelle qui est pertinente à ses objets, qui n'est pas réductible aux lois régissant les niveaux inférieurs (« *more is different* ») mais qui, en même temps, ne doit pas composer avec les principes régissant les autres niveaux. Lane (2006) souligne justement comment les sciences sociales, rapidement citées dans leur ensemble par Anderson, ne se distinguent pas par un niveau d'observation spécifique, mais par des questionnements et des principes d'organisation spécifiques du même objet d'étude, les sociétés humaines. Toutes observent des phénomènes à des échelles très différentes, du niveau micro de l'agent individuel à celui macro de la société dans son ensemble, en passant par différents niveaux d'échelles intermédiaires, mais l'économie se focalise sur les principes régissant la production et l'échange des richesses, la sciences politique sur la question du pouvoir, la sociologie sur l'interaction et l'organisation sociale, l'anthropologie sur la culture, la géographie sur l'espace et les lieux... Le fait que des paradigmes plus quantitativistes et néo-positivistes coexistent dans presque chaque discipline avec des paradigmes plus herméneutiques ne fait que démultiplier les points de vue disponibles sur la connaissance des systèmes sociaux.

L'objet « ville » a ainsi été investi par toutes les sciences sociales, voire par certaines sciences humaines (Lepetit et Topalov 2001). La ville est en effet à la fois un objet économique, géographique, sociologique, anthropologique, politique, historique, archéologique... et bien évidemment urbanistique. Les concepts sur la ville ont ainsi souvent des provenances disciplinaires multiples mais la complexité même de l'objet a permis souvent à ces concepts de migrer d'une discipline à l'autre, avec éventuellement des adaptations nécessaires à la sortie des cadres théoriques dans lesquels ils avaient été conçus. Il en découle que ces concepts sont toujours inévitablement polysémiques et

polymorphes et introduisent incertitudes et ambiguïtés dans la démarche du géographe (tout comme du sociologue, de l'économiste, du politiste, etc.) qui les manipules.

Des concepts pour la ville et ses mutations, en lien avec le contexte géographique de leur formulation

De façon plus spécifique, **géographes, urbanistes et sociologues ont proposé des réflexions sur la nécessaire mutation des concepts pour appréhender la ville à la suite de l'accélération des transformations urbaines des dernières décennies.** J'ai déjà rapidement effleuré en entrée du Chapitre 1 le foisonnement de concepts que l'on peut retrouver dans la littérature : transition urbaine, métropolisation, métapolisation, etc. Les années 90 ont été particulièrement féconds dans le renouvellement du vocabulaire de l'analyse urbaine, témoignant du décalage que les chercheurs percevaient entre les phénomènes observables et les concepts hérités de la géographie urbaine et de l'urbanisme des trente glorieuses.

Marc Wiel (1999) et Gabriel Dupuy (1991, 1999) concordent sur le fait que la mobilité facilitée par les nouvelles infrastructures de transport a été un puissant facteur d'étalement urbain et de dédensification. Les auteurs travaillant plus spécifiquement sur la métropolisation (Bassand 1997, Lacour et Puissant 1999) et sur la métapolisation (Ascher 1995, Bourdin 2014) soulignent plus particulièrement la montée en puissance de la mise en réseau des territoires, l'apparition de nouvelles fonctions métropolitaines, nécessitant des espaces dédiés, l'extension des fonctionnements métropolitains sur des vastes étendues territoriales allant au-delà de la métropole stricto sensu, c'est-à-dire de la grande ville agglomérée.

En réalité, bien plus tôt, Françoise Choay (1994) avait observé que l'ère de la communication universelle devient l'ère de l'urbanisation universelle. L'opposition ville/campagne était un prisme classique d'analyse à la fois dans la littérature des premiers urbanistes du XIX^e siècle (voir Choay 1965, Raymond 1968) et auprès des fondateurs du marxisme. Ainsi Engels (1872-73), dans ses articles sur la question du logement, identifie dans le changement d'organisation sociale permis par le communisme la seule manière de dépasser l'opposition ville-campagne exacerbée par la révolution industrielle. Dans « Le règne de l'urbain et la mort de la ville » Choay (1994) arrive précisément à la conclusion que cette opposition est désormais dépassée à la fin du XX^e siècle et que la notion plus sociologique, voire encore géographique (mais aux frontières plus floues et aux échelles dilatées), de l'urbain doit se substituer à la vision que les urbanistes avaient de la ville comme objet morphologique précisément délimité du territoire rural environnant. Le problème de la définition épistémologique de l'objet d'étude, la ville, trouve un écho dans les réflexions interdisciplinaires de Bertuglia et al. (1998) sur la complexité urbaine en géographie, en urbanisme, en économie et en sociologie. Dans l'introduction à l'ouvrage, ces auteurs soulignent comment dans la société contemporaine la ville semble avoir perdu, au moins partiellement, les caractéristiques qui jadis en faisaient une entité claire et distincte, qui allait de soi et pouvait être distinguée d'autres systèmes spatiaux, une catégorie logique presque « naturelle ».

Le sociologue Michel Bassand (1997, 2001) convient avec Choay de la nécessité de parler du phénomène urbain plus que de la ville. Il différencie d'emblée les différents étages interconnectés de ce phénomène : la morphologie de ses éléments physiques et naturels (qui sont au centre des réflexions des urbanistes et d'une certaine géographie urbaine), les pratiques sociales qui s'y déroulent (ici la géographie sociale rencontre la sociologie) et les représentations que les acteurs se font de ces morphologies et de ces pratiques (domaine de prédilection de la sociologie, de la sciences politique et d'une certaine psychologie sociale). Surtout, l'interaction entre ces trois niveaux est à situer dans le temps historique et Bassand reconnaît l'existence de trois grands « régimes urbains », qui se sont

succédés au cours de l'histoire urbaine (Mumford 1961, Bairoch 1985), donnant des contenus différents à des objets géographiques que l'on aurait tendance à penser comme définis une fois pour toutes. Le premier régime est celui des cités au sein des sociétés agraires (de l'antiquité au moyen âge, jusqu'à la fin de l'ère moderne) dans lequel la ville, objet physique et politique bien délimité, constitue une concentration exceptionnelle d'activités, d'habitants et d'institutions politiques au sein d'un espace géographique et d'une économie qui restent essentiellement ruraux. Le second régime démarre avec la révolution industrielle en Angleterre d'abord, en Europe continentale et en Amérique du Nord ensuite : c'est celui des villes et de l'urbanisation, dans lequel la population urbaine dépasse pour la première fois la population rurale, qu'elle draine de façon importante, et donne naissance aux premières grandes agglomérations, interconnectées par des infrastructures de transport, et caractérisées par l'apparition de nouveaux objets urbains (la grande industrie, les grandes surfaces commerciales, les équipements techniques, les métros, etc.). Le troisième régime, déjà identifié par Choay, est celui de l'urbain et de la métropolisation au sein des sociétés informationnelles : dans les pays ayant atteint ce niveau d'organisation socioéconomique et spatiale, l'espace rural est résiduel, l'urbain est omniprésent comme modèle sociologique de référence, sous l'impulsion des métropoles interconnectées qui asservissent à leur fonctionnement (quotidien, hebdomadaire, saisonnier) de vastes étendues de territoire ; les chaînes de création de la valeur, dont les hubs se situent précisément dans les grandes métropoles, se concentrent sur la gestion des flux et des informations plus que sur la production des biens matériels.

Or, les espaces métropolisés contemporains, surtout dans les régions à l'urbanisation ancienne comme l'Europe, incluent en leur sein également les héritages morphologiques des cités prémodernes et des villes et agglomérations de l'ère industrielle. Il s'agit de voir de quelle manière ces objets physiques ont pu s'adapter aux fonctionnements métropolitains plus récents en se coordonnant avec d'autres formes d'organisation de l'espace géographiques qui sont caractéristiques du nouveau régime. On peut, au moins, citer les deux grandes mutations physiques et fonctionnelles suivantes.

La première est la question de **la ville diffuse, des formes spatiales hybrides entre la ville agglomérée et les espaces ruraux et naturels**. Ce phénomène a été différemment défini et analysé selon le contexte géographique des recherches conduites. En France, les principaux concepts mobilisés sont ceux de périurbain et de périurbanisation (Vanier 2000, Berroir et al. 2015) mettant l'accent sur la dépendance vis-à-vis des villes-centres de ces vastes espaces, essentiellement (mais pas uniquement) résidentiels, où les lotissements pavillonnaires et l'urbanisation individuelle diffuse pèsent plus ou moins lourdement selon le contexte régional et donnent lieu à des morphologies bigarrées typiques du morcellement foncier français. Le concept plus proche du périurbain en contexte nord-américain est celui du *suburb* (Beauregard 2006, Teaford 2008), qui se caractérise normalement par des vastes étendues de lotissements pavillonnaires relativement plus compacts et aux morphologies plus uniformes, tout en montrant la même dépendance fonctionnelle de la ville-centre et étant associé à des forts niveaux de mobilité automobile. Tant le périurbain français que les *suburbs* nord-américains voient désormais d'importantes zones commerciales et d'activités surgir dans les nœuds à plus forte accessibilité routière au sein des étendues résidentielles (Wiel 1999, Bunting and Filion 2006), prenant parfois, aux Etats-Unis, la forme spécifique de la *edge city* (Garreau 1992).

Un second concept relativement employé dans la géographie française est celui de rurbain (un concept ancien en réalité, déjà employé par Guerin et Gumuchian 1979) mettant l'accent sur le contexte plus rural de la nouvelle colonisation métropolitaine, avec ses noyaux villageois et ses espaces agricoles mités par les résidences des métropolitains. Ici aussi, le concept nord-américain plus proche est celui de *ex-urban* (un concept également ancien, déjà proposé par Spectorsky 1955, mais repris

plus récemment dans l'analyse des espaces métropolisés par Berube et al. 2006) ou même de *post-suburban* (Lucy et Philips 1997). L'idée de base est celle d'une colonisation métropolitaine au-delà du périurbain. L'éloignement physique et fonctionnel des villes-centres et de leurs équipements est plus prononcé, mais les ressorts du télétravail, des tiers lieux, de l'essaimage local des dynamiques entrepreneuriales métropolitaines ont fait surgir l'horizon d'une relation différente aux villes-centre par rapport à celle de stricte dépendance qui avait traditionnellement caractérisé le périurbain.

Les concepts de *città diffusa* (Indovina 1990, 2009) et d'urbanisation dispersée (Barattucci 2006) employés en Italie font référence à la fois à l'éparpillement résidentiel, alternant maisons individuelles et petits bâtiments collectifs dans des tissus relativement discontinus, et à la forte mixité fonctionnelle typique des districts industriels du nord et du centre du pays, et des districts agricoles et artisanaux du Mezzogiorno, mixité à une échelle relativement fine, rarement observable en France et en Amérique du Nord. Les concepts italiens sont beaucoup plus attentifs aux morphologies physiques et sociales des nouvelles urbanisations diffuses, là où la définition française du périurbain assigne un rôle essentiel à la dépendance fonctionnelle, mesurée par exemple par le biais des flux de navettes domicile-travail sur un maillage communal. La plus grande capacité de l'aménagement urbain allemand à préserver les limites physiques et institutionnelles des villes a, au contraire, donné lieu au concept de *Zwischenstadt* (Sieverts 1997) : s'il est vrai que des phénomènes de fragmentation résidentielle s'observent (*Zersiedlung*), les autres fonctions urbaines continuent à se concentrer dans les agglomérations. Le concept de *desakota* (McGee 1991) a été proposé dans le contexte de l'urbanisation diffuse de l'Asie du Sud où les réalités villageoises (*desa* en indonésien) deviennent, en contexte métropolitain, un nouveau ciment de l'organisation interstitielle des villes (*kota* en indonésien), sans perdre les caractéristiques morphologiques qui leur sont propres ainsi qu'une certaine présence d'activités agricoles intensives. L'archipel métropolitain d'Indovina (2009), observée dans la plaine de Vénétie, est probablement la structure spatiale européenne la plus proche du *desakota* asiatique.

En conclusion, les différents contextes géographiques ont donné lieux à des concepts bien particuliers pour rendre compte du phénomène de diffusion de la ville à faible densité (étalement urbain) autour ou entre agglomérations existantes, avec des caractéristiques morphologiques bien particulières (lotissements ou construction individuelles éparpillées) et des rapports fonctionnels qui ne sont pas toujours les mêmes avec les villes-centres (dépendance des espaces résidentiels versus complémentarité de nouveaux espaces productifs). La transposition des concepts d'un contexte géographique à l'autre ne se fera donc pas sans un certain glissement de sens, mais on peut également penser qu'un même processus de fond, la diffusion/dilution du fait urbain, puisse montrer de manière plus aigües certaines facettes qui la caractérisent dans tel ou tel contexte géographique.

La seconde question posée par la métropolisation des territoires est celle du caractère plus ou moins centralisé ou polycentrique de l'organisme métropolitain. La métropolisation de l'espace géographique est en effet une dialogie entre la concentration croissante de fonctions économiques supérieures dans un nombre limités de pôles urbains (principe de concentration) et la diffusion corrélative des phénomènes urbain et métropolitain sur des étendues spatiales bien plus vastes. Les deux phénomènes sont seulement apparemment contradictoires ; dans une certaine mesure ils se renforcent. C'est à cause de l'hyper-spécialisation des sols très convoités dans les secteurs à forte signification métropolitaine (centres-villes touristifiés ou hyper-gentrifiés, quartiers des affaires, hubs de la mobilité) que des fonctions urbaines plus classiques (résidences, services à la population) sont poussées à coloniser des espaces plus éloignées autour des villes-centres. Quand la dynamique de ces espaces éloignées est plus endogène (comme dans les districts industriels italiens), les centres métropolitains se font catalyseurs d'opportunités de marché et d'offre de services (finance, marketing,

R&D), renforçant à la fois le développement économique et résidentiels de la ville diffuse. La forme monocentrique de la ville moderne (celle du régime des villes et de l'urbanisation de Bassand) et mise à mal : jusqu'à quel point un seul centre urbain peut coordonner le fonctionnellement et fournir la symbolique territoriale pour une vaste périphérie métropolitaine ? Le régime des villes et de l'urbanisation nous avait en effet légué les premières conurbations (comme la conurbation de la Ruhr en Allemagne), fruit de la coalescence de l'urbanisation de plusieurs centres industriels. Il s'agissait des premiers espaces urbains dans lesquels un polycentrisme fonctionnel et symbolique mettait en crise le schéma classique du centre avec ses auréoles concentriques de périphérie. Le régime de l'urbain et de la périurbanisation peut de surcroît généraliser la mise en réseau qui s'observe entre les métropoles internationales (Veltz 1996) aux échelles du déploiement métropolitain local. Le polycentrisme réticulé s'impose à l'échelle régionale, à partir d'une pluralité de villes-centres, conurbées ou physiquement séparées, incluant également les nouvelles centralités émergentes qui sont les villes-nouvelles, les technopôles ou les concentrations fonctionnelles autour des aéroports internationaux et des gares de la grande vitesse ferroviaires hors agglomération (centres d'affaires, centres de congrès, espaces logistiques, parcs touristiques, etc.). La littérature géographique est riche d'études montrant le caractère polycentrique des aires métropolitaines contemporaines (Van der Laan et al. 1998, Schwanen et al. 2004, Berroir et al. 2007). Clairement **le polycentrisme métropolitain pose également la question de sa graine d'observation (un maillage communal est-il toujours convenable pour le déceler ?), du point de vue adopté (concentrations physiques observables, fonctionnements, quotidiens ou hebdomadaires, symboliques des lieux, etc.) et finalement de la définition même du concept de centralité (parle-t-on de la même chose lorsque on identifie la centralité d'un quartier et celles d'une aire métropolitaine ?).**

... et quelques implications pour la connaissance urbaine

La rapide présentation de ces deux questions clés posées par la transformation métropolitaine des villes n'avait pas la prétention d'éliminer les ambiguïtés liées à l'emploi de tel ou tel concept dans l'analyse que le géographe peut fournir sur les espaces urbains aujourd'hui. Au contraire, elle souhaitait aiguïser le lecteur au fait que privilégier quelques entrées particulières (les formes, les fonctionnements, la gouvernance, les appropriations et la symbolique métropolitaine) peuvent éclairer différemment nos connaissances sur la ville contemporaines.

L'analyse et la modélisation spatiale doivent intégrer ces réflexions pour renouveler l'ontologie de leurs analyses de leurs modèles si elles souhaitent contribuer à l'avancée des connaissances sur l'organisation spatiale des villes contemporaines. **La pluralité des connaissances possibles ne doit pas être vue comme un frein mais, au contraire, comme une situation de dissonance cognitive que l'on s'efforcera d'exploiter de façon positive.** Ainsi, pour faire un exemple très concret, les ambiguïtés liées aux concepts de *suburban*, *ex-urban*, *post-suburban*, amènent Ban et Ahlqvist (2009) à l'emploi de la logique floue dans l'espace des concepts. L'incertitude des définitions est alors transformée par ces auteurs dans un ressort pour enrichir l'analyse du cas d'étude de l'Ohio centre-septentrional.

Il est vrai que, de manière plus générale, la pluralité des concepts et des connaissances nous oblige à réfléchir sur le paradigme scientifique assumé, pour nous ouvrir davantage à l'horizon de la pensée complexe. Ainsi Batty (2013, p. 24) sur les conséquences pour une nouvelle science de la ville : « *Nous tous articulons notre compréhension de la ville de différentes manières, impliquant ainsi que les villes sont des kaléidoscopes d'une pluralité, d'une multiplicité d'idées, de perceptions, de théories, de modèles – à vrai dire de toute possible abstraction que nous pouvons imaginer pour elle. Il est ainsi relativement difficile de nous convaincre qu'une approche en particulier pour la compréhension de la*

ville doit être prioritaire sur une autre, et cela rend le développement d'une science des villes construite dans la tradition de la science classique comme on la connaît depuis les temps de Newton simplement impossible⁴ ».

2.4 Les hiérarchies sont fondamentales, mais elles ne sont pas tout : le cas des aires métropolitaines

Une première série de recherches m'a permis de me confronter à un aspect particulier de la complexité urbaine : son organisation hiérarchique, notamment en ce qui concerne l'organisation spatiale de systèmes urbains à l'échelle régionale. L'approche n'est pas celle de la modélisation dynamique de l'émergence de ces hiérarchies (comme dans Pumain et al. 1989, ou dans Pumain et Reuillon 2017) mais plutôt celle de la complexité structurelle : comprendre dans quelle mesure des schémas d'organisation hiérarchique peuvent encore rendre compte de l'organisation spatiale de régions métropolitaines, quels enchevêtrements hiérarchiques sont aujourd'hui observables et comment différentes approches analytiques pourraient révéler différentes facettes d'une structuration hiérarchique qui est complexe, incomplète et difficilement saisissable.

Les hiérarchies sont une caractéristique fondamentale des systèmes complexes organisés

Dans son article fondateur « *The architecture of complexity* », **Herbert Simon (1962) souligne comment les systèmes complexes organisés sont des systèmes hiérarchiques, c'est-à-dire composés d'un emboîtement de sous-systèmes ayant une certaine stabilité à leur échelle.** Un système complexe organisé est ainsi composé d'un petit nombre de modules (sous-systèmes) de grande échelle, chacun desquels est à son tour composé d'un nombre relativement réduit de sous-modules d'échelle plus réduite, et ainsi de suite. La hiérarchie dont parle Simon est une hiérarchie d'inclusion.

Simon donne également une explication des avantages de cette structuration hiérarchique dans l'émergence et l'évolution des systèmes complexes. L'assemblage progressif de modules hiérarchiquement emboîtées permet au processus d'assemblage de mieux résister aux aléas qui viennent le perturber. Cela est vrai pour des machines complexes produites par l'homme (Simon fait l'exemple de l'assemblage de montres) mais pourrait être également une clé pour comprendre l'évolution spontanée des organismes vivants.

Pour Simon, une grande variété de systèmes complexes hiérarchiques sont également quasi-décomposables, à la fois verticalement et horizontalement. La quasi-décomposabilité verticale implique que les différents niveaux hiérarchiques ont différentes échelles spatio-temporelles : les niveaux plus élevés ne sont pas seulement plus grands que les niveaux inférieurs (ils doivent les inclure), mais surtout ils ont d'autres échelles de stabilité temporelle et peuvent être considérés comme étant constant pour les niveaux inférieurs. La quasi-décomposabilité horizontale, en revanche, implique qu'au sein d'un même niveau hiérarchique, les interactions entre les éléments de différents sous-systèmes y sont relativement négligeables par rapport aux interactions entre éléments à l'intérieur de chaque sous-système. De surcroît, les différents sous-systèmes s'interfaçent uniquement par leurs entrées/sorties collectives : un sous-système peut être remplacé par un second assurant la même entrée et la même sortie sans perturber le fonctionnement du système. La vision des hiérarchies de niveaux parfaitement emboîtées pour l'organisation des systèmes complexes a été successivement critiquée par Lane (2006), qui opère d'emblée une distinction très importante entre les hiérarchies

⁴ Ma traduction.

d'ordre (permettant d'ordonner des entités ontologiquement équivalente selon un paramètre donné, par exemple les villes rangées par leur taille au sein d'un système urbain), d'inclusion (où des relations mérologiques d'appartenance ordonnent des entités ontologiquement non équivalentes), de niveaux (nécessitant l'identification de niveaux fonctionnels ordonnés dans le système) et de contrôle (liées à la relation de commandement entre les unités). Les hiérarchies d'inclusion de Simon semblent plus aptes à rendre compte de l'organisation de systèmes artificiels produits par les humains (comme les montres de son exemple paradigmatique) qu'à appréhender les structures complexes de l'auto-organisation des systèmes écologiques et sociaux. Lane (2006) oppose ainsi l'approche de Simon aux successives tentatives de Anderson (1972) et de Holland (1998) de rendre compte de la relation entre complexité et organisation hiérarchique et d'explorer dans quelle mesure elle peut s'appliquer aux systèmes sociaux.

En réalité, Simon conclut son raisonnement par une réflexion épistémique plus critique. **Est-il vrai que tous les systèmes complexes auto-organisés présentent un emboîtement hiérarchique de modules rendant intelligible leur complexité ? Ou bien, notre pensée étant capable uniquement d'appréhender la complexité par une organisation en niveaux hiérarchiques emboîtés, nous ne sommes pas capables d'identifier d'autres organisations possibles pour la complexité du réel ?**

Anderson (1972) affine la réflexion de Simon et la met en relation avec les mécanismes physiques permettant de faire émerger des hiérarchies d'inclusion quasi-décomposables dans les sciences naturelles. Pour Holland (1998), en revanche, les hiérarchies qui caractérisent l'organisation des systèmes complexes auto-organisés ne sont pas des hiérarchies d'inclusion parfaitement emboîtées. Elles sont plutôt des hiérarchies de niveaux, qui n'imposent même pas un ordre total au système et qui présentent différents types d'enchevêtrement. A la différence de Simon et Anderson, Holland se pose dans une optique de complexité dynamique : il essaye de comprendre le processus d'émergence des niveaux hiérarchiques à partir des dynamiques d'interaction entre les éléments.

D'autres auteurs comme l'anthropologue et philosophe Bruno Latour et l'historien Carlo Ginzburg, provenant du courant plus herméneutique et qualitatif des sciences sociales, réfutent l'utilité à la fois des hiérarchies et des méthodes quantitatives dans l'analyse des systèmes sociaux. Lane (2006) s'inspire de leurs critiques pour permettre de dépasser les apories des visions proposées par Simon, Anderson et Holland, lorsqu'il est question d'adapter l'approche des hiérarchies à l'analyse des systèmes sociaux. Ainsi, pour Lane, il est au moins nécessaire de reconnaître que dans les systèmes sociaux, tels qu'ils sont observables dans une phénoménologie qui découle de plusieurs millénaires d'auto-organisation :

1. Les hiérarchies, de niveau, d'inclusion ou de contrôle, sont presque toujours enchevêtrées et presque jamais quasi-décomposables.
2. Les processus d'émergence se font souvent aux niveaux intermédiaires au fur et à mesure que la société se complexifie (cfr. Durkheim 1893, Béjin 1974) : des structures intermédiaires émergent entre les éléments et le tout qui les précèdent.
3. Les hiérarchies sont triadiques et doivent intégrer le caractère délibéré des actions humaines : entre le niveau micro des éléments en interactions pourvus d'objectifs poursuivis (individus, ménages, entreprises, etc. selon le domaine étudié), et le niveau macro du système social dépourvus d'objectifs clairement définis, se forment des méso-structures, issues des patterns récurrents d'interaction des éléments micro qui, à un certain niveau de consolidation, peuvent acquérir une capacité autonome de poursuivre des objectifs.

Les hiérarchies d'ordre ont été en revanche au centre d'autres recherches dans le domaine de la science de la complexité. Barabasi (2002) et Newman (2006) ont ainsi étudié la distribution statistique

des composantes des systèmes complexes en fonction de leur taille. Ils ont montré que les processus d'auto-organisation aboutissent normalement à des distributions en loi de puissance. Les mécanismes de l'attachement préférentiel pourraient être une possible explication de ces distributions, surtout en ce qui concerne les phénomènes sociaux. Je soulignerai dans le Chapitre 3 dans quelle mesure la loi de puissance est aujourd'hui vue comme une signature de l'auto-organisation des systèmes complexes. Nous allons voir, dans ce qui suit, comment ces réflexions peuvent se décliner dans la compréhension de l'organisation spatiale d'un système de villes et quelles mutations s'observent actuellement dans la structuration des aires métropolitaines. L'échelle est donc ici régionale ou métropolitaine. L'application de ces mêmes concepts à l'organisation interne de la ville sera discutée dans le Chapitre 3.

Les hiérarchies des systèmes cristallins doivent être remises en question

Dès les années 40, Zipf (1949) avait montré comment la taille démographique des villes dans un système urbain donné suit une distribution en loi de puissance, une hiérarchie d'ordre qui ne présuppose aucune structuration spatiale du système des villes. **La géographie urbaine possédait en réalité déjà un corpus théorique pouvant justifier qu'un système urbain soit structuré en modules hiérarchiquement emboîtés, parfaitement décomposables** et présentant une distribution statistique de la taille des éléments pouvant être approximée par une loi de puissance. Il s'agit de **la théorie des lieux centraux** proposée par Christaller (1933) et Lösch (1940). L'optimisation des économies d'échelles et le maillage de l'espace géographique, contraint par une fonction de distance, permettent à ces auteurs de proposer les célèbres modèles d'aires de marché parfaitement emboîtées pour des centres urbains de taille croissante pouvant offrir des biens et des services de plus en plus rares. Chaque centre commande un réseau de relations hiérarchiques et exclusives avec les centres de niveau inférieur, au sein d'un module présentant une forme hexagonale (dans le cas d'un espace géographique isotrope) et s'emboîtant dans des modules d'ordre supérieur, eux-aussi hexagonaux. Christaller pense pouvoir offrir une vérification empirique de ses modèles théoriques par l'analyse des systèmes urbains dans le sud de l'Allemagne.

Batty (2013, p. 47) offre une lecture de la théorie des lieux centraux pouvant la rendre compatible avec l'auto-organisation des systèmes complexes : « La compétition implicite dans l'agglomération est également reflétée par le fait qu'il y a beaucoup plus de petites villes que de grandes villes, avec l'asymétrie que pour devenir une grande ville, il faut d'abord avoir été une petite ville. Cela se reflète dans la régularité de la distribution de la taille des villes, que nous mesurons en ordonnant leur population. Les villes sont également distribuées par rapport à leur taille de manière à que les petites villes soient emboîtées dans l'hinterland de villes plus grandes. Cela aussi implique que les grandes villes soient espacées davantage que les petites, et la structure hiérarchique résultante est codifiée dans la théorie des lieux centraux⁵ ».

Or, comme le souligne Batty, la théorie des lieux centraux ne consiste pas seulement à dire que la taille démographique des villes suit une loi de puissance (observation relativement a-spatiale de la loi de Zipf) : elle donne un schéma spatial (et une justification théorique de ce schéma spatial) à la distribution des villes dans l'espace géographique. La hiérarchie d'ordre dans la taille des villes se couple d'une hiérarchie d'inclusion d'aires urbaines emboîtées, pouvant également correspondre à une hiérarchie de contrôle dans la division administrative du territoire.

⁵ Ma traduction.

Dans la réalité, des schémas cristallériens « purs » sont rarement observables. Les structures hexagonales hiérarchiquement emboîtées prévues par la théorie des lieux centraux seraient toujours perturbées par des nombreux phénomènes secondaires (anisotropie de l'espace géographique, présence d'obstacles hydrographiques et orographiques, phénomènes historiques particuliers ayant contraint ou poussé la croissance de quelques villes, etc.) et donc aucun géographe ne s'attendrait à les trouver de façon « pure » dans la réalité. Il se pose également la question de fond de l'adéquation du modèle cristallérien avec les réalités urbaines contemporaines. La théorie des lieux centraux était conçue pour expliquer la distribution de biens et de services urbains dans une économie encore essentiellement agricole. Elle était sensée fournir des lignes guide pour la structuration de l'urbanisation croissante de la société industrielle, mais déjà dans les années 30 elle ne laissait pas de place pour la conurbation de la Ruhr ou pour Berlin, la capitale déjà quatre fois millionnaire : les capitales régionales cristallériennes ont une population optimale de 300 000 habitants. Quelle pertinence peut alors avoir cette théorie à l'heure de la globalisation et de la métropolisation croissante des régions urbaines ?

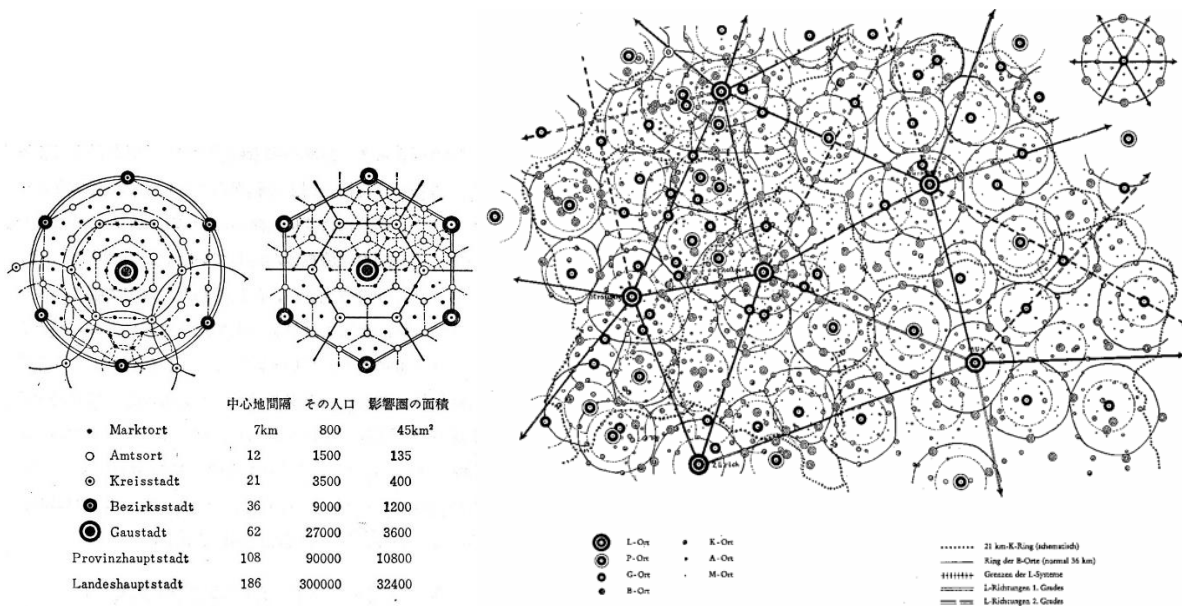


Figure 2.2 – Les hiérarchies emboîtées des espaces centraux dans le sud de l'Allemagne (Christaller 1933).

Pour autant, la théorie des lieux centraux continue à avoir une influence culturelle considérable en Europe centrale et orientale. En codirigeant la recherche doctorale de S. Bauer à l'Université Technique de Darmstadt (Bauer 2016), j'ai pu bien constater l'importance normative des schémas cristallériens dans l'aménagement urbain allemand, comme bien expliqué par Blotevogel (2002). Les plans d'aménagement fédéraux et de chaque Land attribuent à chaque ville un niveau hiérarchique bien précis découlant du modèle cristallérien. Ces niveaux sont repris dans les plans d'urbanisme des collectivités locales. La localisation des équipements publics comme privés doit ainsi se conformer aux types d'activités autorisées dans chaque commune allemande selon son rang dans la hiérarchie théorique du modèle cristallérien. Même si la rigidité du schéma cristallérien a été souvent critiquée (Blotevogel 1996), son adéquation ne semble pas être mise en discussion dans le débat allemand sur l'aménagement du territoire.

Mais quel est, aujourd'hui, le degré d'adéquation empirique des schémas cristallériens ? Le verdict semble sans appel : en répliquant l'analyse pour les systèmes urbains allemand, français et

italien, Cagliani (2008) montre qu'un modèle de localisation aléatoire respectant la distribution statistique des villes réelles (qui est en soi une loi de puissance) est plus proche de la distribution géographique empirique que les schémas prévus par la théorie des lieux centraux. En statistiques, on dirait que l'hypothèse zéro (absence du modèle) ne peut pas être écartée... et que donc les données empiriques ne viennent pas corroborer le modèle théorique christallérien. La hiérarchie d'ordre de la taille de ville peut donc bien exister indépendamment de la hiérarchie d'inclusion d'aires urbaines emboîtées.

Partant de considérations plus cognitivistes, Cagliani suggère que les schémas christallériens pourraient être plus simplement la projection de notre esprit sur la complexité des systèmes urbains. Il s'agirait d'une paréidolie, la tendance naturelle qu'a le cerveau humain à identifier des *patterns*, des structures simples (les niveaux hiérarchiques emboîtés en sont), là où il n'y en a pas. On rejoindrait ainsi l'observation finale de Simon sur notre incapacité à voir autre chose qu'une organisation hiérarchique emboîtée dans le déchiffrement des systèmes complexes et celle, plus générale, de Taleb selon lequel nous avons tendance à produire davantage de théorie que ce qui est effectivement supporté par les données empiriques.

L'organisation des espaces urbains en contexte métropolitain ne se réduit pas à une hiérarchie

L'organisation fonctionnelle des espaces urbains régionaux à l'heure de la métropolisation a été au cœur de mes problématiques de recherche pendant plus de cinq ans. Cette section me permet ainsi un premier retour d'expérience, où la question de la décomposition d'un système complexe se nourrit de l'analyse des relations entre les éléments du système, avec une approche réticulaire, à plusieurs niveaux d'agrégation. Un point central de la réflexion de Simon sur l'architecture des systèmes complexes organisés est la quasi-décomposabilité de la plupart des systèmes complexes structurés en modules hiérarchiquement emboîtés. En géographie urbaine, la quasi-décomposabilité des systèmes urbains est à la fois un postulat de la théorie des lieux centraux (voir ci-dessus), mais fonde également les analyses empiriques des régions nodales. Nystuen et Dacey (1961), dans leur travail fondateur sur les flux téléphoniques entre les villes de l'Etat de Washington, montrent comment définir des régions urbaines à partir de flux dominants caractérisant chaque ville du système. Le flux sortant d'une ville est considéré comme étant dominant s'il est le premier flux et s'il se dirige vers une ville de taille supérieure. Nystuen et Dacey se limitent à l'analyse de ces premiers flux sortant car les autres flux se révèlent être de bien moindre importance dans leur cas d'étude. Sous ces hypothèses fortement simplificatrices, les algorithmes d'extraction de flux dominants peuvent extraire d'une matrice d'interaction spatiale (quantifiant les flux échangés) un squelette de relations hiérarchiques décomposant le système urbain en modules indépendants. Il est également possible d'envisager un emboîtement d'échelles dans l'analyse, passant aux flux échangés non pas entre les unités spatiales de départ (villes, communes) mais entre les modules constitués d'un centre dominant avec ses unités dominées (basin de domination). Une nouvelle matrice d'interaction spatiale peut alors être recalculée à partir de ces nouvelles entités et les traitements réitérés. Ce protocole permet d'identifier l'emboîtement des modules au sein des systèmes urbains et d'identifier la multiplicité des niveaux d'organisation.

Le problème est que **les systèmes urbains et métropolitains sont de moins en moins quasi-décomposables.** L'émergence d'aires et de régions métropolitaines intégrées est au cœur d'importantes transformations des flux échangés par les villes, leur communes périurbaines et rurales. Suite au *mobility turn* dans les sciences sociales (Urry 2000, 2007), **les mobilités ont émergé comme un aspect fondamental de l'organisation socio-spatiale contemporaine. Elles peuvent, dès lors, être utilisées comme un indicateur de la transformation métropolitaine des territoires.**

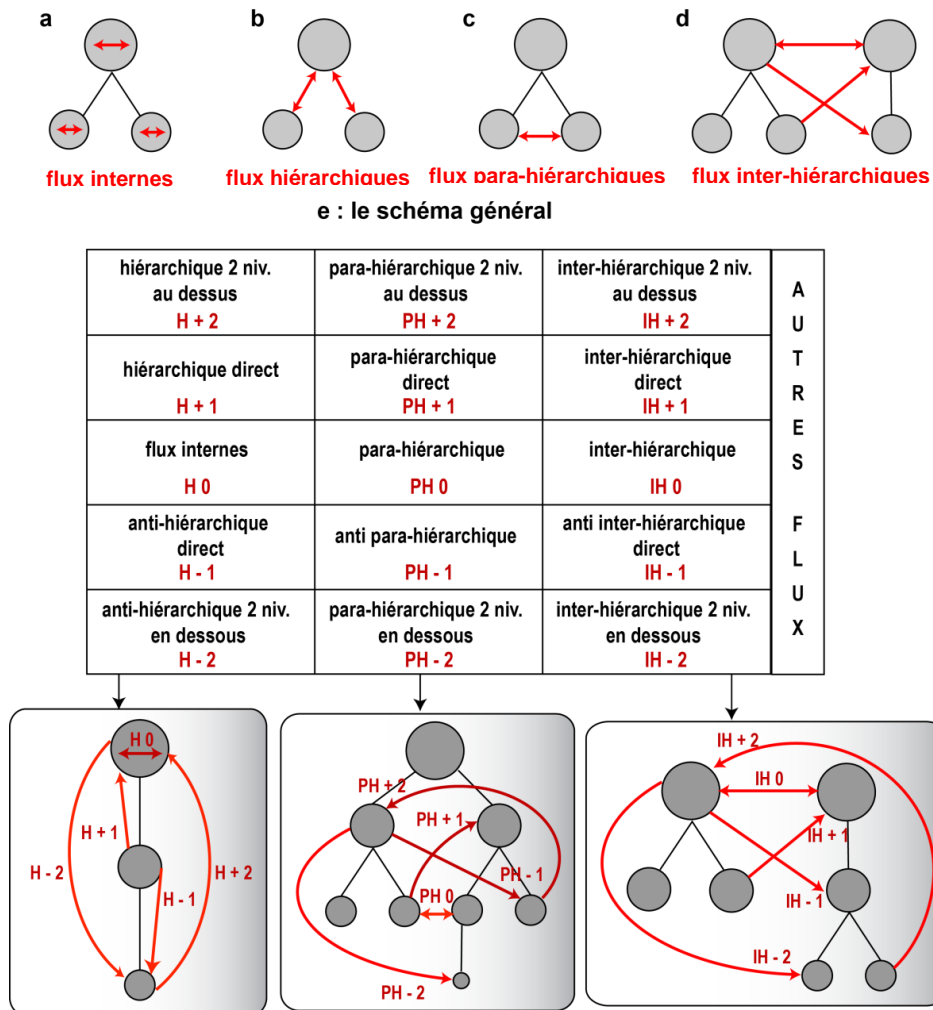
Les flux de mobilité dans une aire métropolitaine ne sont pas l'issue d'un processus aléatoire. Ils utilisent des réseaux physiques (les infrastructures de transport) et leur répétition au cours du temps donne forme à des nouveaux réseaux relationnels au sein du semis urbain d'une aire métropolitaine. Plus particulièrement, les flux de mobilité quotidienne (systématiques ou non) sont l'issue d'arbitrages de plus longue période entre les mobilités quotidiennes et résidentielles (Kaufmann 2000). Ces arbitrages ont lieu au sein de semis urbains hérités du passé et contribuent à leur évolution vers des organisations spatiales en réseaux. La métropolisation accélère ces processus de mise en réseau à différentes échelles (ici celle relativement plus locale de l'organisation interne d'une aire ou d'une région métropolitaine). En même temps, elle peut bouleverser les hiérarchies urbaines héritées du passé, organisées par des bassins urbains moins interdépendants, en intégrant des villes précédemment non concernées par les fonctionnements métropolitains et en rajoutant des nouvelles centralités métropolitaines émergentes.

La contraction de l'espace-temps (Bretagnolle et al. 1999) est cependant anisotropique et peut produire des effets tunnels : des connections infrastructurelles rapides peuvent rapprocher davantage deux centres métropolitains régionaux que les petites villes et les villages qui se situent entre eux. Le polycentrisme métropolitain, à toute ces échelles, est précisément le résultat d'une mise à système croissante des lieux, au sein de laquelle des relations privilégiées peuvent aboutir à des organisations plus ou moins hiérarchisées, qui restent à étudier. Des nouvelles approches analytiques sont alors nécessaires pour vérifier en quelle mesure les hiérarchies des régions nodales sont encore en mesure de rendre compte des organisations métropolitaines, caractérisées par l'émergence du polycentrisme et des relations horizontales entre les centres.

Rabino et Occelli (1997) avaient ainsi déjà suggéré que les hiérarchies nodales pouvaient être un point de départ utile, mais n'étaient pas suffisantes pour rendre compte de la complexité des relations spatiales dans une aire métropolitaine. Leur raisonnement est corroboré par des premiers résultats empiriques sur la région italienne du Piedmont et sur l'aire métropolitaine turinoise. Dans les recherches conduites sur la métropolisation de l'espace méditerranéen français, j'ai eu la possibilité de me confronter avec les intuitions théoriques de Rabino et Occelli, de confirmer leurs premiers résultats et de développer ultérieurement leur approche méthodologique. En m'inspirant de leur méthode, j'ai ainsi proposé une nouvelle typologie des relations pouvant exister entre les centres d'un réseau urbain hiérarchisé. Cette typologie prend en compte 16 catégories de flux, regroupées en quatre grandes familles (Figure 2.3) :

- a) Les flux internes à l'unité spatiale : il s'agit des flux qui ont le même lieu pour origine et pour destination. La part de ces flux est révélatrice de l'autonomie de l'unité spatiale par rapport aux logiques réticulaires régionales.
- b) Les flux hiérarchiques reliant les lieux le long d'une même branche de domination. Ce type de flux permet de vérifier la pérennité de certaines organisations hiérarchiques classiques issues de la théorie des lieux centraux. Les flux dominants font partie de cette famille, ils relient chaque unité spatiale au centre qui la domine.
- c) Les flux para-hiérarchiques englobent les relations entre lieux faisant partie d'un même réseau mais pas le long de la même branche de domination. Ils complexifient les schémas de mobilité à l'intérieur d'un bassin de domination.
- d) Les flux inter-hiérarchiques sont toutes les relations qui s'établissent entre des lieux qui ne font pas partie du même bassin de domination.

2. La complexité des villes et des aires métropolitaines



G. Fusco, F. Scarella, UMR ESPACE, 2011

Figure 2.3 - Une nouvelle typologie des flux dans un réseau urbain hiérarchisé.

En intégrant la prise en compte de la significativité du flux dominant (un problème déjà soulevé par Kipnis 1985 ainsi que par Rabino et Occelli 1997) et l'itération à plusieurs niveaux des bassins de domination, j'ai pu ainsi mettre au point une nouvelle démarche d'analyse (Figure 2.4). La démarche a été opérationnalisée par la plateforme logicielle ART (Analyse des Réseaux Territoriaux, Fusco 2009) et mise à l'épreuve de l'analyse diachronique des flux de navettes domicile-travail et des migrations résidentielles dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur au cours des années 80 et 90 (Fusco et Scarella 2012, 2013).

Région complexe, aux fortes contraintes topographiques et à l'urbanisation ancienne, la région PACA a connu au cours des dernières décennies l'émergence de deux espaces métropolitains polycentriques, comme déjà montré dans des études précédentes analysant le semis urbains et les flux de mobilités potentielles (Fusco et Decoupigny, 2008 ; Decoupigny et Fusco, 2009). À l'ouest, le binôme Aix-Marseille interagit de façon croissante avec les villes de l'Étang de Berre et de l'aire toulonnaise. À l'est, l'aire azurée est en train de se constituer en espace métropolitain littoral, autour de Nice, Monaco, Cannes et Antibes. De vastes portions de l'arrière-pays alpin dépendent directement du fonctionnement métropolitain de ces deux principales concentrations urbaines. D'autres, de moins en moins nombreuses, semblent rester à l'écart de ces transformations

territoriales. Cet espace régional se montrait ainsi idéal pour étudier les nouvelles organisations spatiales de ses aires métropolitaines.

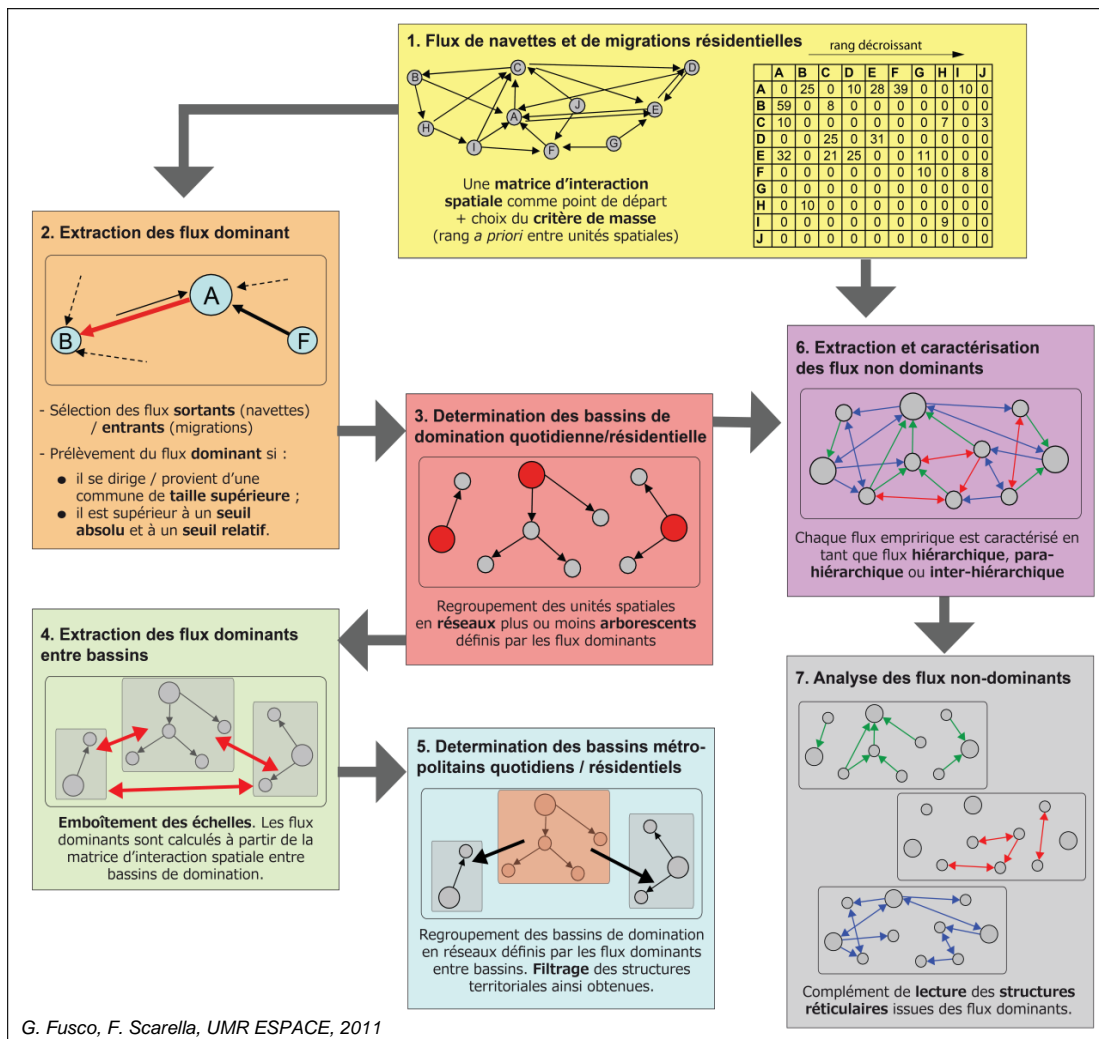


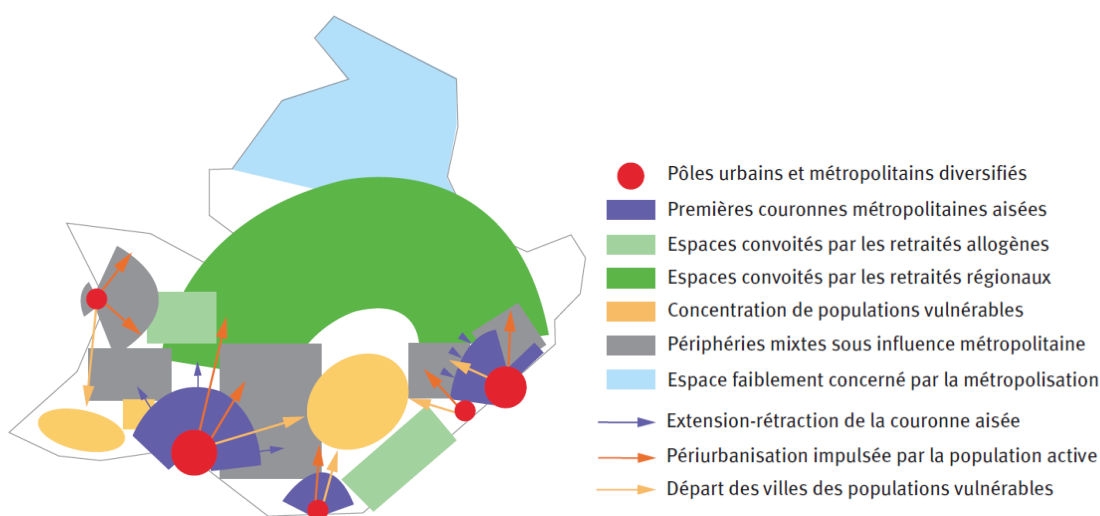
Figure 2.4 – Démarche d'analyse des flux de mobilité dans un réseau urbain hiérarchisé.

L'article de 2012 (Fusco et Scarella 2012) porte sur l'analyse des flux des migrations résidentielles et leur contribution à la morphologie sociale des aires métropolitaines de PACA. Il s'agit d'une première application concrète de la plateforme ART, mais l'analyse aborde les relations spatiales dans une région métropolitaine en privilégiant encore la structuration hiérarchique des flux dominants. En cela, notre recherche ne montre pas toute la complexité des relations réticulaires dans un espace métropolitain. Elle permet néanmoins d'identifier un premier niveau de complexité spatiale de la morphologie sociale d'une région métropolitaine. Plus précisément, l'article propose une étude conjointe des mobilités résidentielles et des niveaux de concentrations de certaines populations cible au sein de l'espace régional de Provence-Alpes-Côte d'Azur. En se plaçant dans le contexte d'avancée de la métropolisation, l'analyse s'interroge également sur les relations entre ce processus global et la ségrégation résidentielle. Les analyses proposées, fondées sur des calculs de quotients de localisation et sur le filtrage des flux de mobilités résidentielles à partir de la théorie des flux dominants, font apparaître de très fortes distinctions spatiales des schémas résidentiels des populations cible. Les plus

2. La complexité des villes et des aires métropolitaines

remarquables sont celles des cadres et des chômeurs qui s'évitent dans l'espace résidentiel, entretenant ainsi des configurations spatiales ségréguées (une observation déjà avancée par Centi 1996 en ce qui concerne l'aire métropolitaine marseillaise). Les résultats soulignent également la complexité des configurations spatiales produites par les différentes populations cible ainsi que la sensibilité de la dynamique ségrégative aux particularités locales.

Le croquis de synthèse (Figure 2.5) suggère l'existence de structures semblables autour des principaux foyers de métropolisation dans l'espace régional ainsi que l'interaction entre les différentes dynamiques métropolitaines (par exemple dans le cas du centre Var). Si l'existence d'auréoles et de secteurs autour des principaux foyers de métropolisation est évocatrice des modèles théoriques de l'Ecole de Chicago, le polycentrisme des structures métropolitaines et les contraintes de l'espace (relief, littoral) produisent une structuration régionale beaucoup plus complexe.



G. Fusco, F. Scarella, UMR 6012 ESPACE, 2011. ©L'Espace géographique.

Figure 2.5 – Morphologie sociale et dynamiques à l'œuvre dans les aires métropolitaines de PACA.

Le recherche sur les recompositions territoriales en région Provence-Alpes Côte d'Azur (Fusco et Scarella 2013) fournit en revanche une analyse bien plus complète de la complexité des relations réticulaires dans une région métropolitaine : elle prend en compte la complexité des relations allant au-delà des seuls flux dominants dans les aires métropolitaines, propose une première décomposition multi-niveau des structures métropolitaine et étudie l'imbrication des logiques des navettes domicile-travail avec celles des migrations résidentielles. Le Tableau 2.2 permet de saisir les grandes tendances des familles de flux des mobilités quotidiennes et résidentielles en région PACA entre 1982 et 1999. Le poids des flux internes baisse au cours du temps, aussi bien pour les mobilités quotidiennes que résidentielles. L'intensité des mobilités intercommunales a donc augmenté : les actifs travaillent de plus en plus loin de leur lieu de résidence, et les ménages changent de logement de moins en moins au sein de la même commune. Les flux hiérarchiques englobent environ 45 % du total des flux externes pour les navettes et 18 % pour les migrations résidentielles. Ces poids ont tendance à stagner, avec un léger recul des flux hiérarchiques directs. Le poids des flux para-hiérarchiques est en constante augmentation pour les deux types de mobilité, signe d'une complexification des relations intercommunales au sein des réseaux urbains. En parallèle, on constate une baisse du poids des flux interhiérarchiques, c'est-à-dire ceux qui se font entre différents bassins de domination. Ainsi, la métropolisation semble renforcer les liens intra-métropolitains plutôt que les liens inter-

métropolitains. De plus, avec l'extension métropolitaine et la coalescence de plusieurs bassins de domination dans un plus grand réseau urbain, les flux interhiérarchiques diminuent.

Flux :	totaux	% internes	externes	% hiérarchiques dominants	% hiérarchiques	% para-hiérarchiques	% inter-hiérarchiques	% autres
Navettes 1982	1 443 471	68,1	460 249	31,8	45,9	13,3	31,0	9,8
Navettes 1999	1 640 171	54,4	748 626	30,3	45,3	24,1	21,4	9,2
Migrations 1975-1982	2 415 909	43,6	1 363 728	12,4	17,7	7,6	22,8	51,8
Migrations 1990-1999	2 742 100	37,1	1 726 108	10,6	18,1	11,2	20,7	50,1

Tableau 2.2 - Évolution des mobilités quotidiennes et résidentielles en région Paca entre 1982 et 1999.

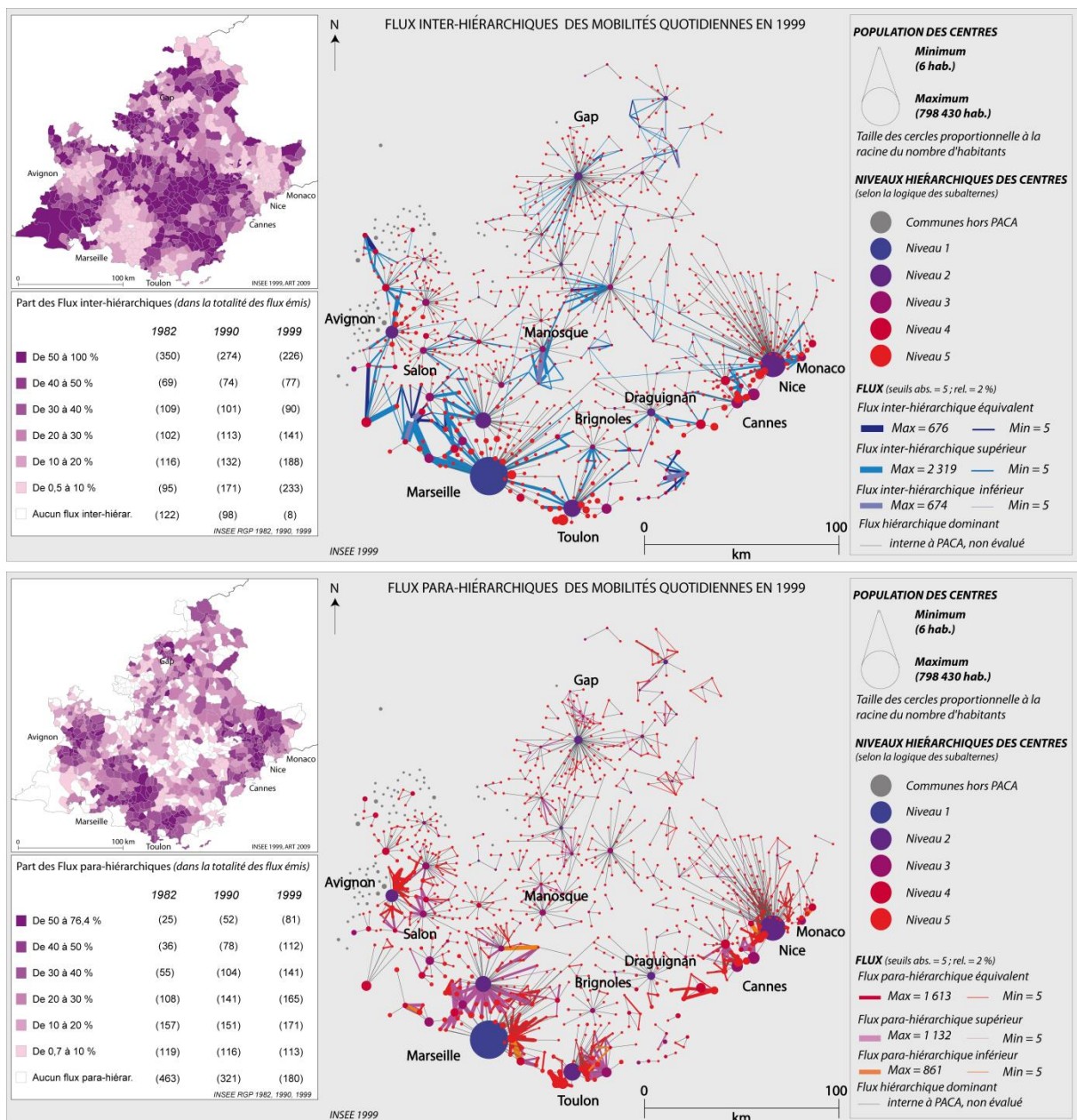


Figure 2.6 – Relations inter-hiérarchiques et para-hiérarchiques en région PACA.

La Figure 2.6 montre précisément l'importance des flux inter-hiérarchiques et para-hiérarchiques des navettes domicile-travail en région PACA en 1999, auxquels il faudrait encore ajouter les flux « autres », qui correspondent à des relations inter-hiérarchiques avec des bassins de domination hors région PACA.

La recherche sur les dynamiques métropolitaines en région PACA arrive à la conclusion que les recompositions territoriales sont multiples et que nos analyses ne proposent que la lecture d'une des facettes de ce vaste et complexe processus. Il semble en revanche acquis que la prise en compte des seuls flux dominants entre communes, point de passage obligé pour l'extraction des réseaux régionaux, n'est pas suffisante pour appréhender les recompositions territoriales induites par la métropolisation. L'application de la méthode à des échelles emboîtées et la prise en compte des flux autres que dominants apportent des contributions essentielles à l'analyse. **On revient à la question de fond posée par Alexander (1965) : les régions urbaines, comme les villes, sont-elles vraiment modélisables par des arbres sous-entendant des systèmes quasi-décomposables ?**

En prenant en compte la dimension diachronique et la comparaison entre plusieurs types d'interaction spatiale, renvoyant à des logiques différentes de mise en réseau, notre réponse ne peut qu'aller dans le sens d'Alexander. Les aires métropolitaines produisent une multiplicité de réseaux relationnels, avec des nombreux recouvrements qui ne peuvent pas être modélisés par des simples arbres hiérarchisés. Même lorsque l'attention se porte sur un seul type d'interaction spatiale, permettant d'identifier des arbres hiérarchisés, les relations hiérarchiques sont de moins en moins exclusives par rapport à la richesse des relations horizontales et verticales, para- inter- et anti-hiérarchiques, qui caractérisent les fonctionnements métropolitains. Comme pour les *patterns* émergents de Holland (1998), les hiérarchies sont entremêlées.

En ce qui concerne la connaissance territoriale produite, nos analyses mettent en évidence la diversité des situations au sein de la région PACA. Plusieurs facteurs de différenciation peuvent être soulevés :

- D'abord, la complexité morphologique, différenciant les deux principaux réseaux métropolitains régionaux. Le réseau marseillais présente ainsi un polycentrisme hiérarchisé et multi-scalaire, pouvant compter dès le début de la période analysée sur des relais de centralité en plusieurs directions. Plus simple, le réseau azuréen est davantage marqué par centralité niçoise, dominant directement un vaste arrière-pays. Il retrouve une certaine complexité réticulaire seulement sur la bande littorale, grâce aux centres de Cannes et Monaco. Le fait marquant des dernières décennies a été néanmoins l'émergence d'un réseau métropolitain azuréen indépendant de Paris en ce qui concerne les migrations résidentielles.

- En deuxième lieu, la taille (et la situation) des villes ainsi que l'ampleur des bassins de domination qu'elles structurent. Les petites communes (souvent à l'intérieur des terres) ont des trajectoires bien plus différenciées que celles observées pour les grandes communes du littoral. Ainsi dans l'espace alpin stricte indépendance, organisation dans des réseaux locaux et rattachement aux dynamiques métropolitaines littorales, se mélangent. La croissante domination résidentielle des centres littoraux fait néanmoins présager un rattachement progressif aux fonctionnements métropolitains quotidiens.

- En troisième lieu, l'éventuelle correspondance entre les échelles spatiales de la domination quotidienne et résidentielle. L'aire d'influence de la métropole marseillaise correspond à un bassin départemental dans les fonctionnements quotidiens, et à un bassin régional pour les fonctionnements résidentiels liés aux cycles de vie des ménages. Des centres métropolitains moins structurant, comme Avignon et Toulon, montrent des bassins semblables pour les mobilités résidentielles et quotidiennes.

- Finalement, la dynamique : la relative stabilité des structures réticulaires produites par les mobilités quotidiennes s'oppose aux évolutions plus rapides des structures définies par les mobilités résidentielles. S'agit-il d'un décalage historique entre les élargissements respectifs des bassins d'emploi et résidentiels provoqués par la métropolisation ? L'élargissement des bassins de mobilité quotidienne serait désormais acquis et consolidé dans des structures réticulaires relativement stables, tandis que l'évolution des modes de vie et des aspirations qui guident les mobilités résidentielles serait encore en train de produire des recompositions territoriales. Dans une région relativement contrainte et dans laquelle les réseaux de transport ont peu évolué au cours des trente dernières années, les bassins de mobilité autour des principaux centres ont probablement atteint leurs limites. L'extension métropolitaine pourrait alors se poursuivre seulement par l'essaimage de populations et d'activités vers des centres plus lointains.

Plusieurs perspectives de développement s'ouvrent également pour l'analyse de cet espace régional. Nos analyses ont particulièrement ciblé les années 1980-1990, période clé de la formation des structures métropolitaines dans l'espace régional de PACA, suite à l'achèvement du processus d'urbanisation des trente glorieuses au cours des années 70 (Ferrier, 1983). Actuellement, l'extension des analyses serait possible avec les données des nouveaux recensements tournants de l'INSEE produites à partir de 2006, moyennant des protocoles tenant compte de la spécificité de ces données.

L'analyse plus fine de l'interaction entre mobilité quotidienne et résidentielle, notamment dans une optique de prospective territoriale, constitue aussi une perspective de recherche (le nouveau recensement permet notamment d'analyser de façon conjointe les mouvements quotidiens et résidentiels des individus). Par ailleurs, le moteur résidentiel et touristique de la métropolisation de la région PACA, suggère une analyse croisée avec les mobilités touristiques. La mobilité facilitée (avion, TGV, autoroutes) et une certaine "fidélisation" de la fréquentation touristique (révélée, par exemple, par la propriété d'une résidence secondaire) pourraient ainsi anticiper des migrations résidentielles à l'occasion d'un changement biographique important (retraite, mutation, nouvelle activité).

Avec ses spécificités, la métropolisation de la région PACA n'est pas représentative des dynamiques observables dans l'ensemble des régions françaises. Au-delà des connaissances acquises sur ce territoire, nous soulignons néanmoins la reproductibilité de la démarche d'analyse à d'autres espaces d'étude. Une approche comparative dans l'étude des configurations métropolitaines et de leurs changements dans le temps dans différents espaces régionaux serait particulièrement précieuse pour identifier ce qui est spécifique et ce qui est partagé dans les transformations métropolitaines des territoires.

La convergence avec l'analyse des réseaux complexes

« *Hierarchical Clustering through Spatial Interaction Data* » (Fusco et Cagliani 2011) fait converger la recherche géographique des régions urbaines fonctionnelles avec les plus récents protocoles d'analyse des réseaux complexes. Un objectif qui leur est commun est la détection d'ensemble hiérarchiques de regroupements d'unités de base permettant de représenter l'organisation globale du système. Dans cette recherche, l'optimisation de la modularité dans les réseaux complexes est comparée à la définition de régions fonctionnelles polarisées à travers l'approche des flux dominants (voir supra). À partir des travaux fondateurs de Bavelas (1948) et de Freeman (1977, 1979), les analystes des réseaux complexes ont développé au cours des vingt dernières années des concepts et des méthodes pour détecter et analyser les communautés dans les réseaux (Fortunato 2010, Porter et al. 2009, en ce qui concerne les réseaux sociaux Wasserman et Faust 1994). Intuitivement, les communautés sont des regroupements de nœuds au sein d'un réseau qui ont des liens plus forts entre

eux qu’avec le reste du réseau. L’analogie avec le problème géographique de la définition de régions urbaines fonctionnelles est évidente car, d’une part, les matrices d’interaction spatiale définissent des réseaux complexe entre les unités spatiales, et, de l’autre, la région fonctionnelle se fonde précisément sur une maximisation de la décomposabilité du système urbain (Dauphiné 1979). En suivant des approches qui sont typiques de la mécanique statistique, les communautés sont vues par les analystes des systèmes complexes comme des structures mésoscopiques moyennant les propriétés des nœuds qui les composent. Ces entités mésoscopiques interagissent pour expliquer l’organisation macroscopique du réseau dans son ensemble.

En bâtissant sur les précédentes recherches, l’espace régional de Provence-Alpes-Côte d’Azur a été le terrain de cette convergence d’approches méthodologiques. Le réseau des flux de navetteurs entre les communes PACA est constitué de 964 nœuds et de 34 527 relations en 1999. Il présente une distribution exponentielle des degrés des nœuds (Figure 2.7), qui suggère une croissance relativement aléatoire.

Cependant, les centres principaux, en montrant des écarts positifs à la courbe d’interpolation, introduisent des relations hiérarchiques qui ne sont pas conformes à un modèle de graphe aléatoire. La distribution des flux dominants, concernant 114 nœuds et 816 relations, représente presque un tiers des flux totaux (Tableau 2.1) mais montre une distribution sans échelle, en loi de puissance, suggérant une structure hiérarchique auto-organisée (Barabasi 2002).

La méthode relativement classique des régions nodales, en dépit de ses limites (que nous venons de voir dans la section précédente) peut ainsi se raccorder avec les principes de base de l’organisation des systèmes complexes. Il devient dès lors intéressant de comparer ses résultats avec ceux issus de la détection de communautés au sein des réseaux complexes. Toute solution analytique à la détection de communautés dans les réseaux complexes est numériquement intraitable. Ils existent ainsi plusieurs solutions algorithmiques permettant de parvenir à des bonnes partitions dans des temps de calculs raisonnables. De Montis et al. (2011) distinguent trois groupes d’algorithmes : de division, d’optimisation et spectraux. Les méthodes d’optimisation nécessitent d’une fonction-objectif. La modularité d’une partition est celle plus communément utilisée et est ainsi définie (Newman 2004) :

$$Q = \sum_C (\sum_{C_{in}} / 2m - (\sum_{C_{tot}} / 2m)^2) \tag{1}$$

où $\sum_{C_{in}}$ est la somme du poids des relations qui sont entièrement dans la communauté C , $\sum_{C_{tot}}$ est la somme des poids des liens externes allant vers un nœuds de la communauté C , et m est la somme des poids de tous les liens dans le réseaux. Ainsi définie, la modularité varie entre -1 et +1 et mesure la densité des liens au sein des communautés comparé aux liens entre les communautés.

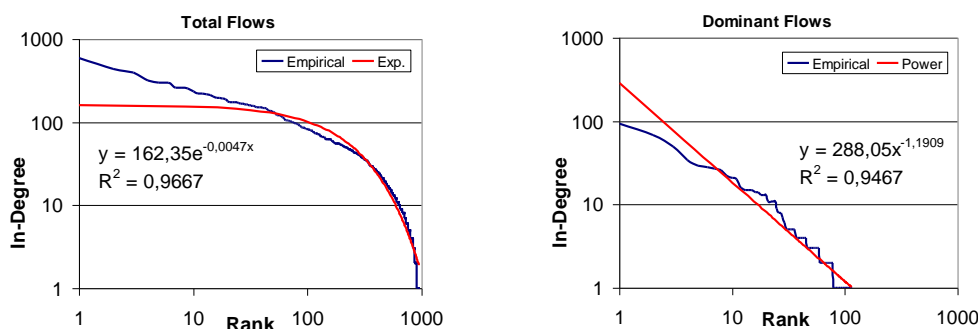


Figure 2.7 – Le réseau relationnel des flux de navettes en PACA en 1999 : distributions statistiques.

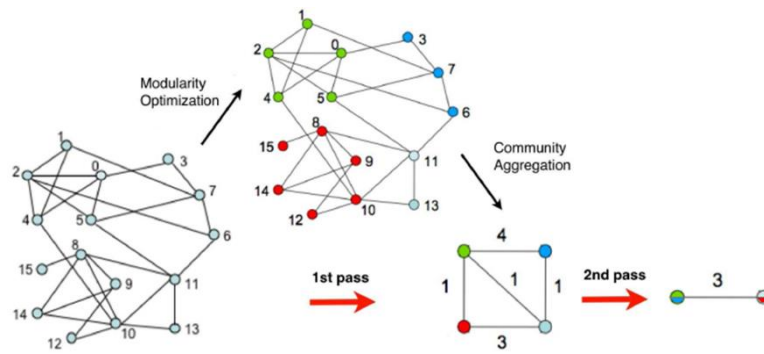


Figure 2.8 - Utilisation récursive de l'optimisation de la modularité dans les réseaux (Blondel et al., 2008)

Blondel et al. (2008) ont développé l'algorithme de recherche de partitions à forte modularité dans les grands réseaux que nous avons utilisé dans le cadre de notre recherche. L'algorithme identifie une suite hiérarchique de communautés emboîtées et se structure en deux phases qui peuvent être itérées. La première phase optimise l'assignation des nœuds dans les communautés par une approche algorithmique de type glouton. La seconde phase revient à construire un nouveau réseau dont les nœuds sont les communautés trouvées dans la phase précédente (Figure 2.8). Une fois comptabilisés ou éliminés les flux internes, la première phase est lancée à nouveau pour déterminer des communautés de communautés, et ainsi de suite. On parvient ainsi à une organisation hiérarchique parfaitement emboîtée des nœuds du réseau initial, même si aucune relation hiérarchique n'est identifiée entre les éléments d'une communauté à un niveau donnée de l'analyse. Or, la même application récursive peut s'effectuer pour la détection des flux dominants entre bassins dominés par un centre nodal (Figure 2.4), rendant les deux approches beaucoup plus comparables. Finalement, la méthode des flux dominants et une approche locale (le bassin de domination d'appartenance est identifié par une seule relation significative de chaque unité spatiale) ; l'optimisation de la modularité implémente une approche globale, tout en devant se contenter de solutions suboptimales pour faire converger rapidement l'algorithme vers une solution. Les deux méthodes peuvent produire des hiérarchies d'inclusion parfaitement emboîtées (même si pas forcément spatialement contiguës) à partir d'une matrice d'interaction spatiale.

Les cartes en Figure 2.9 montrent ainsi les hiérarchies urbaines résultant de l'application itérée de l'extraction des flux dominants (haut) et de la détection des communautés par optimisation de la modularité (bas). Les deux séries de résultats ne sont pas identiques mais ne renvoient pas non plus des images très discordantes de l'organisation urbaine régionale. La coïncidence est presque remarquable pour l'emboîtement des hiérarchies urbaines autour de Marseille et d'Avignon.

À la fois les flux dominants et les communautés confirment l'inadéquation des limites administratives départementales pour rendre compte des structures métropolitaines régionales. Au-delà des limites de ces structures, la principale différence entre les deux méthodes est que les flux dominants recherchent des régions urbaines polarisées, où il soit possible d'attribuer un niveau hiérarchique différent à chaque centre au sein de structures arborescentes. La partition de l'espace en bassins de domination est un sous-produit de la méthode. L'optimisation de la modularité vise en revanche précisément cette partition globale de l'espace. En tant que méthode locale, les flux dominants peuvent détecter la percolation des structures hiérarchiques qui s'opère par l'existence d'un seul lien dominant entre centres (ou entre bassins lors de l'itération de la méthode), à condition de dépasser un certain seuil de significativité.

2. La complexité des villes et des aires métropolitaines

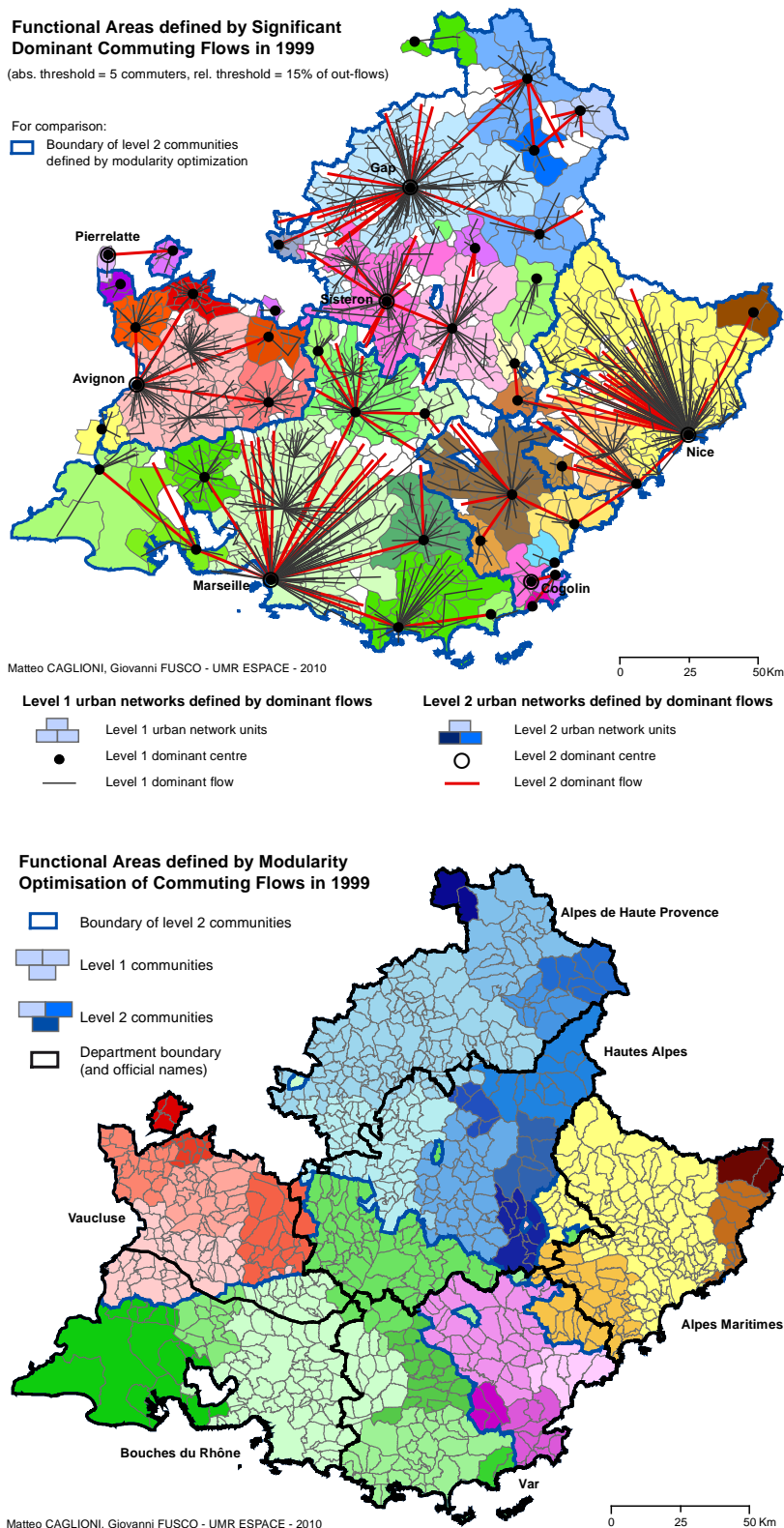


Figure 2.9 – Hiérarchies urbaines par l’approche des flux dominants (haut) et des communautés (bas).

La structure de l’aire métropolitaine azuréenne fournit un bon exemple : son extension vers l’ouest, dans le département du Var, est due aux liens privilégiés que les bassins de Fréjus et de Draguignan entretiennent avec celui de Cannes à la seconde itération de la méthode. Les flux horizontaux entre

les différentes composantes varoises sont néanmoins particulièrement forts et l'optimisation de la modularité identifie une grande communauté de second niveau, comprenant également l'aire de Saint-Tropez et bien séparée des deux structures métropolitaines qui l'entourent.

D'autres nuances ont été apportées à ces résultats par l'application de l'approche de l'analyse des liens multiples (Hagget et al. 1977) dans l'extraction des flux dominants. Cette approche permet de fractionner les bassins de domination de la Figure 2.9 (haut) en bassins de mono-polarisation, permettant de vérifier si le postulat de Nystuen et Dacey (1961) est effectivement satisfait dans l'aire d'étude. La structuration interne de l'aire métropolitaine marseillaise n'est pas significativement modifiée, tandis que l'aire azurée se fractionne dans des bassins plus petits (autour de Nice, Monaco, Cannes, Antibes, Grasse) qui ne se regroupent pas tous à l'itération successive de la méthode : les situations de mono-polarisation y sont bien plus rares, indiquant que les structures hiérarchiques des régions nodales sont probablement moins aptes à rendre compte de son organisation métropolitaine.

Globalement, les différentes méthodes, et leurs différentes applications, permettent de saisir des aspects complémentaires de la structuration métropolitaine régionale qu'une seule méthode n'aurait pas permis de détecter. C'est donc **la combinaison des méthodes et la comparaison des résultats** qui nous **permet d'avancer dans la compréhension des hiérarchies urbaines en contexte métropolitain et de nous rapprocher de la complexité des systèmes urbains étudiés.**

C'est une confirmation pratique du point de vue défendu par Porter et al. (2009) qui soulignent la valeur considérable d'avoir une multiplicité d'heuristiques computationnelles susceptibles de donner des éclairages complémentaires sur les mêmes bases de données relationnelles. **D'un point de vue méthodologique, la convergence entre les approches de l'analyse spatiale des systèmes urbains et celle des réseaux complexes doit se poursuivre. Le présupposé très contraignant des hiérarchies d'inclusion pourrait ainsi être dépassé par l'approche des cliques avec chevauchements** (Palla et al. 2005), **permettant d'identifier les éléments et des structures d'interface au sein de hiérarchies enchevêtrées.**

Ce ne sont pas les hexagones qui posent problème, mais les arbres

Effectivement, de façon plus globale, l'ensemble des recherches sur les réseaux urbains en contexte métropolitain présentées jusqu'à ici montre que la principale inadéquation des schémas cristallériens porte sur leur topologie plus que sur leur géométrie. Il est en effet communément admis que les contraintes topographiques puissent déformer la géométrie hexagonale et le précis jeu d'inter-distances théorisés par Christaller (Figure 2.2). Il me semble que, de façon beaucoup plus profonde, se pose la question de l'adéquation du schéma cristallérien avec les fonctionnements des régions métropolitaines contemporaines. Ce ne sont pas les hexagones qui posent problèmes, mais les arbres.

Les hiérarchies d'inclusions cristallériennes ont pu peut-être rendre compte de l'organisation spatiale de réseaux urbains prémodernes, avec des centres pourvoyeurs de services de plus en plus rares au sein d'une économie essentiellement rurale, selon un schéma encore décelable dans le sud de l'Allemagne au début du XX^e siècle (ni la conurbation de la Ruhr ni l'agglomération de Berlin ne rentraient cependant dans ce schéma).

La topologie arborescente des hiérarchies d'inclusion montre tous ses limites à appréhender l'organisation des réseaux urbains en contexte métropolitain : les relations horizontales entre centres (para-hiérarchiques et inter-hiérarchiques) se développent, les situations de mono-polarisation permettant d'accepter l'hypothèse de quasi-décomposabilité du système sont de moins en moins la

règle, les bassins de domination des centres peuvent correspondre plus ou moins bien à des communautés capables de contenir l'essentiel des flux échangés. La complexité structurelle des réseaux est supérieure à ce que l'on avait l'habitude d'admettre.

Les centralités métropolitaines varient selon le point de vue que l'on privilégie

Une dernière recherche (Fusco et Saint-Amand 2013) me permet de revenir sur la question du concept même de centralité dans un espace métropolitain. L'attention est ici moins sur l'analyse du caractère plus ou moins emboîté des hiérarchies de centres, mais sur les attributs permettant de définir les centres et leurs bassins d'influence. Tout en acceptant l'idée que l'aire métropolitaine n'est pas un simple bassin de domination d'une grande agglomération, mais peut avoir une configuration polycentrique avec des bassins d'influence non exclusifs, on pose la question si d'autres mobilités que celles liées aux navettes domicile-travail peuvent structurer un fonctionnement métropolitain. Kaufmann (2004) et Seewer (2004) soulignent ainsi le rôle croissant des mobilités liées au commerce, aux loisirs et aux services dans des sociétés métropolitaines où le temps libre devient une dimension importante de la vie sociale. Les mobilités du weekend peuvent ainsi être révélatrices d'une autre organisation spatiale de la métropole, comme suggérée par Decoupigny (2006).

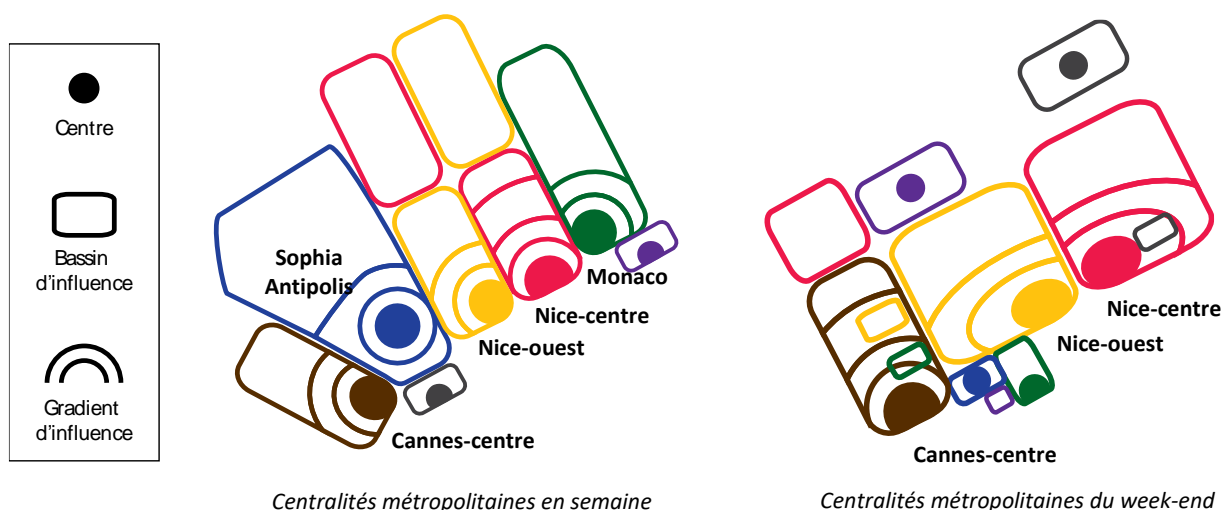


Figure 2.10 – Croquis spatiaux des centralités métropolitaines sur la Côte d'Azur.

L'analyse spatiale des flux de mobilité entre les secteurs de la métropole azurienne confirment ces hypothèses. Les données de l'Enquête Ménages-Déplacements de 2008 ont ainsi été utilisées d'abord pour identifier les concentrations des flux en jour ouvré et en fin de semaine et ensuite pour délimiter des bassins d'influence et un gradient de captation des flux au sein de ses bassins. La centralité dans une aire métropolitaine émerge dans cette recherche comme une propriété systémique dans l'espace relationnel des flux, plus que comme l'accumulation de fonctions et de bâtiments. Les centralités métropolitaines identifiées pendant le jour ouvrable modifient à peine l'image déjà obtenue par les analyses sur la maillage communal (Fusco et Scarella 2013). Les deux principaux centres métropolitains (Nice-centre et Monaco) sont ainsi complétés par Cannes-centre, par deux nouvelles centralités émergentes (la technopole de Sophia Antipolis ou encore Nice-Ouest avec son aéroport, son quartier des affaires et ses espaces d'activités) ainsi que par deux centres traditionnels de moindre envergure (Figure 2.10, gauche).

Mais une géographie des centralités métropolitaines bien différentes se dessine en fin de semaine (Figure 2.10, droite). Les aires centrales modifient leur périmètre pour inclure les bords de mer (attracteurs de mobilités de loisir ou de commerce) ou bien ils sont brutalement remplacés par des zones de loisir dans l'arrière-pays alpin. La hiérarchie métropolitaine des centres est altérée, parfois bouleversée. Même si la métropole continue à s'articuler autour de sept centres, Monaco disparaît complètement et le bord de mer de Nice-Ouest, avec ses concentrations de commerces et de loisirs, devient une nouvelle centralité métropolitaine de premier niveau. Les flux centrifuges ne sont cependant pas la principale caractéristique des fonctionnements métropolitains de weekend pour deux raisons (cfr. Mirloup 1983, Decoupigny 2006) : d'abord, les centres traditionnels du jour ouvré sont également des destinations importantes pour les flux des mobilités commerciales et de loisirs. Ensuite, la morphologie physique de l'aire métropolitaine azurée offre des espaces naturels remarquables, littoraux ou péri-littoraux, dans les interstices des espaces urbains agglomérés, souvent en continuité avec les centralités traditionnelles des jours ouvrés : ils en constituent l'extension spatiale pendant le weekend. Il est ainsi possible de différencier les centres métropolitains selon leurs rythmes (Lefebvre 1992, Gérardot 2007) : les centres-villes traditionnels de Nice et de Cannes sont des centres polyrythmiques, capables de structurer à la fois les fonctionnements métropolitains du jour ouvré et du weekend. Les centres tertiaires comme Monaco sont plutôt des attracteurs monorythmiques de mobilité quotidienne, tout comme les centres attracteurs des mobilités de loisir du weekend dans l'arrière-pays alpin. Contrairement à une conjecture relativement répandue, les flux de mobilité de fin de semaine sont davantage structurés par les centralités métropolitaines que ceux des jours ouvrés. L'aménagement a en effet traditionnellement été plus attentif à localiser services de base et emplois de façon diffuse dans l'aire métropolitaine qu'à prévenir la formation de déserts de loisirs pendant le weekend. L'analyse des rythmes métropolitains pendant la semaine pourrait être complétée par celle des rythmes saisonniers, très importants dans les métropoles touristiques comme la Côte d'Azur. **Il en résulterait encore une fois une vision plus complexe et nuancée par rapport à la représentation bien rassurante des schémas cristallériens : l'organisation spatiale de la métropole varie selon le point d'observation que l'on se donne et la nouvelle économie métropolitaine nous force à considérer des nouveaux points de vue** (les fonctionnements des loisirs, les migrations résidentielles, les fonctionnements touristiques, etc.) qui viennent se composer avec le principe d'organisation plus classique des bassins d'emploi.

Travaux personnels cités dans le chapitre

Decoupigny F., Fusco G. (2009) Mobilités potentielles et émergence de structures réticulaires en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. *L'espace géographique*, vol. 38, No.3, 267-282.

Fusco G. (2009) Modelling Urban Networks from Spatial Interaction Data: the ART Platform, in G. Rabino, F. Scarlatti (Eds.) *Advances in models and methods for Planning*. Pitagora, Bologna, p. 63-72

Fusco G., Cagliioni M. (2011) Hierarchical Clustering through Spatial Interaction Data. The Case of Commuting Flows in South-Eastern France. In B. Murgante et al. (eds.), *Computational Science and its Applications ICCSA 2011, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6782, Springer, 135-151.

Fusco G., Cagliioni M. (2014) Prospecting the evolution of a winegrowing region through MAS modelling, in B. Murgante et al. (eds.) *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2014, Part IV, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8582, Springer, 199–214.

Fusco G., Decoupigny F. (2008) Logiques réticulaires dans l'organisation métropolitaine en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. *Actes du XLV^e colloque de l'ASRDLF*, Rimouski 25-27 août 2008, 18 p.

Fusco G., Scarella F. (2011) Métropolisation et ségrégation socio-spatiale. Les flux de mobilité résidentielle en Provence-Alpes-Côte d'Azur. *L'espace géographique*, 2011/4, 319-336.

Fusco G., Scarella F. (2013) Recompositions territoriales en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Analyse croisée par les mobilités quotidiennes et résidentielles. *Cybergeogeo*, n° 656, <http://cybergeogeo.revues.org/26080>, 26 p.

Fusco G., Saint-Amand P. (2013) Weekly Rhythms in a Polycentric Metropolitan Area: The Case of the French Riviera. *18th Colloquium of Theoretical and Quantitative Geography, Dourdan (France), September 5th-9th 2013*, 16 p.

Vanegas M., Da Costa C., Moreno D., Fusco G., Tettamanzi A., Riveill M., Hernandez J.T. (2017) A New Urban Segregation-Growth Coupled Model using a Belief-Desire-Intention Possibilistic Framework. *Web Intelligence 2017 Proceedings*, Leipzig.

À retenir

- Les théories classiques sur la ville ne reconnaissent pas sa complexité. Tout en s'ouvrant à l'approche systémique et aux modèles de simulation, elles ont fondé l'aménagement urbain jusqu'aux années 70 en le focalisant sur l'usage des sols et l'allocation de ressources et en ignorant à la fois les aspects de forme et l'incertitude des connaissances.
- Ces théories et ces modèles ont été successivement rejetés par des approches plus holistiques et attentives aux questions de forme, ignorant la modélisation quantitative.
- A partir des années 90, la complexité urbaine est théorisée et opérationnalisée en deux grandes directions : la complexité agrégée dynamique (simulation de l'émergence des patterns spatiaux) et la complexité structurelle (étude des formes et des niveaux d'organisation). Les deux laissent encore peu de place à l'incertitude et au jeu d'acteurs.

- Les concepts sur la ville, du fait de sa complexité, sont toujours polysémiques et polymorphes. La question des concepts est d'autant plus aigüe dans une période d'accélération des transformations urbaines car il s'agit d'appréhender des phénomènes émergents comme la diffusion de l'urbain et le polycentrisme.
- Les hiérarchies sont fondamentales pour comprendre l'organisation de systèmes urbains complexes. Le schéma christallérien de hiérarchies emboîtées doit néanmoins être abandonné pour rendre compte d'un niveau de complexité structurelle bien supérieur.
- L'analyse des réseaux urbains dans le contexte de la métropolisation de la région PACA montre en effet l'émergence de hiérarchies enchevêtrées et, en général, l'affaiblissement des situations pouvant justifier le postulat de quasi-décomposabilité des systèmes. L'étude des centralités dans l'aire azurée montre qu'elles varient selon le point de vue choisi et que le principe des bassins d'emploi n'est pas le seul relevant pour la métropolisation.

Questions ouvertes

Qu'est-ce qui change lorsque la focale se porte de l'organisation spatiale des flux et des fonctionnements d'une aire métropolitaine aux questions de la forme physique de la ville ? Quelles relations peuvent être identifiées entre ces différents aspects ? (Chapitre 3).

Comment la polysémie des concepts rejaillit sur l'analyse de la forme urbaine ? (Chapitre 3).

Quelles théories permettent d'aborder la complexité structurelle de la ville ? (Chapitre 3).

Quelles sont les implications de la complexité urbaine pour la connaissance que le géographe peut produire sur la ville et pour toute démarche d'intervention consciente sur l'espace urbain ? (Chapitres 4 et 5).

3. Forme et organisation spatiale de la ville complexe

Après avoir examiné des questions relevant de l'organisation spatiale d'une région urbaine en cours de métropolisation, ce chapitre portera la focale sur l'organisation interne de la ville. Sera plus précisément abordée la question de la forme urbaine comme entrée à l'étude de la complexité structurelle de la ville. Seront également considérées les transformations caractérisant la forme urbaine dans le cadre de la métropolisation.

3.1 La spatialité interne de la ville

Géographes et urbanistes ont une légitimité à aborder la complexité de la ville par sa spatialité

En tant que système spatial, la ville possède également des caractéristiques inhérentes à sa spatialité interne, que l'on différenciera ici des relations spatiales qu'elle nourrit avec les autres villes d'un système urbain. Bien évidemment, cette répartition interne/externe n'est pas toujours aisée dans le contexte de la métropolisation, qui dilate les périmètres de l'urbain. Le concept même de ville doit être ainsi employé de manière relativement étendue : c'est l'ensemble de l'espace urbain au sein d'une aire métropolitaine, incluant autant la ville agglomérée de l'urbanisation traditionnelle que les nouveaux espaces de la ville diffuse (périurbain, rurbain, *Zwischenstadt*, technopôles, centres logistiques, etc.). Dans le cas d'une aire métropolitaine polycentrique on pourrait avoir à faire avec un petit réseau de villes, mais il sera ici appréhendé de façon beaucoup plus détaillée : ce qui est un point dans un semis urbain (comme dans le Chapitre 2), est ici une entité avec sa propre complexité spatiale interne, son étendue surfacique, ses bords, ses réseaux internes, etc.

La morphologie géographique de la ville est précisément l'étude de son organisation spatiale interne (Conzen 1960, Vance 1990). Il s'agit d'une entrée à la recherche sur la ville pleinement légitime pour le géographe car ni l'économie urbaine, ni la sociologie urbaine, ni même l'architecture et l'urbanisme (avec l'exception de quelques auteurs, comme Alexander, Hillier et Salingaros) n'en ont fait l'entrée principale aux phénomènes urbains (voir, à ce sujet, les introductions éclairantes de Vance 1990 et de Hillier et Hanson 1984). L'objet d'étude de cette morphologie est l'organisation de l'espace, physique et fonctionnelle, à l'intérieur de l'organisme urbain, même si des relations inter-scalaires avec le système des villes, surtout dans le contexte de la formation de régions métropolitaines, ne peuvent pas être évacuées. Dans l'économie de cet essai, cette organisation spatiale interne sera également la clé de lecture privilégiée pour la compréhension de la complexité de la ville, notamment de sa complexité structurelle. La complexité liée à la spatialité de la ville est témoignée, entre autres, par la polysémie et la multi-dimensionnalité des concepts clés d'organisation spatiale et de forme urbaine, qui seront employés au cours de ce chapitre.

La spatialité de la ville est à la fois organisation spatiale socio-fonctionnelle et forme urbaine

Pour commencer à différencier ces deux concepts relativement proches, dans son article fondateur « *A city is not a tree* », Alexander (1965) souligne que l'organisation spatiale de la ville est à la fois :

- organisation spatiale des relations socio-fonctionnelles (flux, échanges, rapports de hiérarchie, spécialisations sociales et fonctionnelles des espaces, bref la spatialité des fonctionnements humains de la ville) ;
- « forme urbaine », c'est-à-dire organisation spatiale des composantes physiques de la ville.

Pour Alexander, en effet, le système ville possède un résidu physique d'éléments tangibles (bâtiments, rues, arbres, équipements techniques, mobilier urbain, etc.), temporellement plus stables, qui constituent le réceptacle du mouvement des autres éléments et interagissent avec eux. La forme urbaine est l'organisation spatiale de ces éléments physiques et constitue, de ce point de vue, un aspect plus spécifique de l'organisation spatiale de la ville. L'objectif de l'urbaniste, dit Alexander, est précisément de concevoir la forme physique la plus apte à seconder des organisations socio-fonctionnelles qui ne peuvent pas être réduites à une simple topologie arborescente (voir Section 2.1). La distinction opérée par Alexander est partagée par l'essentiel de la littérature en urbanisme (mais pas forcément en géographie urbaine), depuis Cerdà (1867), jusqu'à Hillier (2012).

Les liens entre ces deux aspects (la spatialité des formes physiques et celle des fonctionnements) sont multiples et font l'objet d'un important effort de recherche, renvoyant également à d'autres caractéristiques du système complexe. Mes recherches au cours de ces années ont ainsi exploré ces deux volets de l'organisation spatiale urbaine et métropolitaine, y compris leur interaction, avec une prise de conscience croissante de leurs implications.

En dépit de cette distinction, la forme urbaine reste encore un concept relativement polysémique. Selon Lévy (2005, p. 28) « La forme urbaine n'est jamais une donnée *a priori*, elle est toujours un objet d'étude construit à partir d'une hypothèse de définition, d'une représentation, d'un point de vue sur la forme ». Différentes composantes physiques de la ville peuvent en effet être utilisées pour définir une forme urbaine selon l'échelle de l'analyse et le point de vue du chercheur. Différentes caractéristiques spatiales de ces éléments participeront aux relations de forme : rapports géométriques, topologiques, de dimensionnement, fonctionnels, textures, couleurs, etc.

La forme abstraite de la science de la complexité s'éloigne de la phénoménologie de la forme urbaine

Avant de revenir sur ce point, je soulignerais que dans la littérature sur les systèmes complexes, la définition du concept de forme est beaucoup plus large. Dans Prigogine et Stengers (1984), comme dans Holland (1995, 1998) ou Wolfram (2002), la forme est définie comme tout pattern macroscopique relativement stable qui émerge de l'interaction d'éléments microscopiques. La structure spatiale de la ségrégation produite par le modèle de Schelling (1971) est ainsi une forme. Pour Thom (1972, 1983), même la structure qualitative du fonctionnement d'un système dynamique dans l'espace des phases (sans correspondance directe avec l'espace physique) devient une forme. On peut alors dire que les non-linéarités du chaos déterministe produisent des formes fractales dans une section de Poincaré (qui est un sous-espace des variables d'état du système).

Pour résumer, la forme ici est un *pattern* spatial relativement stable, émergent des interactions des composantes du système, dans un espace opportunément défini. C'est la vision de la complexité agrégée dynamique, qui est très redevable des approches de la science physique : les éléments

microscopiques n'ont pas et ne sont pas porteurs de forme en eux, seule l'interaction fait émerger des formes macroscopiques (et éventuellement mésoscopiques, comme les communautés dans les réseaux complexes). Il en résulte une grande attention aux processus de morphogénèse ... sinon on n'observe pas de forme.

Or, si l'on s'intéresse aux formes en tant que structures spatiales des éléments physiques de la ville (au sens d'Alexander, des urbanistes et de la morphologie géographique de Conzen et Vence), les éléments constitutifs du niveau micro ont déjà une forme et cette forme est également porteuse de règles d'agencement/composition pour les niveaux supérieurs. Hillier et Hanson (1984) montrent ainsi que si les éléments constitutifs de la forme urbaine des villages provençaux sont de maisons de ville permettant la mitoyenneté le long de leurs murs porteurs, mais disposant d'un espace vide d'accès devant leur porte d'entrée, qui nécessite à son tour l'interconnexion avec d'autres espaces vides, les formes urbaines résultant de leur agrégation peuvent avoir certaines caractéristiques et pas d'autres. De façon plus générale, à toutes les échelles d'observation, les éléments ont déjà des formes et sont porteurs de règles de composition pour les niveaux supérieurs.

Cette forme urbaine s'éloigne également de celle identifiée par les géographes modélisateurs travaillant dans d'autres approches computationnelles à la complexité urbaine. Ainsi pour Pumain et al. (1989) ou pour Wilson (2000), les *patterns* de localisation des populations, des services et des emplois au sein d'une certaine tessellation de l'espace urbain (districts, quartiers, zonage d'enquête) sont des formes urbaines, et sont l'objet même des modèles à base de théories de la complexité dynamique (synergétique, systèmes dynamiques de type LUTI, etc.). Des *patterns* macroscopiques stables issus de la simulation individu-centrée (comme, par exemple dans Portugali 2000) sont également qualifiés de forme urbaine.

Finalement, je pense que **le projet scientifique de l'étude de la forme urbaine dans le paradigme de la complexité peut s'enrichir de la prise en compte de la forme physique**, avec toute sa pluralité d'échelles. Il s'agit d'**une perspective de recherche qui me semble autant légitime et féconde et, en tous cas, en lien plus direct avec la phénoménologie de la forme urbaine.**

La forme urbaine, facteur de dynamique et source pour des programmes de maintien ou changement

Qui produit les formes ? De manière générale, l'approche dynamique aux systèmes complexes pose la question de la production des formes à partir des interactions microscopiques, tout en restant sur une conceptualisation très large de la forme comme *pattern* macroscopique relativement stable. La création des formes prend néanmoins une signification différente lorsque l'on la cale dans des domaines de recherche plus spécifiques.

Pour Turing (1952), en chimie biomoléculaire, le mouvement crée les formes. Des systèmes de réaction-diffusion chimiques peuvent être à la base de l'autocatalyse des formes ; il suffit de prendre en compte la diffusion différente des activateurs et des inhibiteurs de la réaction chimique en question... un support homogène peut alors produire des formes (*patterns*). Mais lorsque la forme est beaucoup plus complexe, comme dans l'évolution des embryons, les gènes fournissent des catalyseurs du processus morphogénétique. Le matériel génétique fournit un « programme » pour la forme. Dans les deux cas, la forme est soit une conséquence des forces du mouvement, soit une conséquence d'un programme génétique.

Par rapport à cette vision, suggérée par les sciences biologiques, la forme urbaine présente un certain nombre de spécificités :

- d'abord, sa grande inertie temporelle par rapport aux dynamiques de changement : au cours d'une génération humaine, c'est-à-dire 20-30 ans, le changement de forme est normalement marginal par rapport à la ville héritée du passé ;
- ensuite, le fait que la forme existe dans la cognition des acteurs de la ville qui l'intériorisent et l'utilisent comme une heuristique pour la solution d'autres problèmes complexes : le mouvement et l'orientation des piétons et des véhicules dans la ville, le contrôle des accès et la facilitation des rencontres, l'organisation des activités économiques, l'organisation de la croissance et de la transformation de la forme ;
- finalement, le fait que pour la plupart des villes, qui sont fondamentalement auto-organisées, il n'existe pas un « programme » complet pour la construction de la forme : ce qui a pu être le cas pour quelques villes de nouvelle fondation, au moins dans une première phase de leur existence, où la forme urbaine a été déterminée par un plan de construction très détaillé.

Dans ce contexte, la forme ne peut plus être vue comme une simple manifestation de forces (par exemples les forces de la promotion immobilière ou du développement de l'économie urbaine, qui seraient les facteurs de la dynamique et du changement) ou d'un programme. Elle est facteur de dynamique et de changement à son tour. La forme est également une heuristique de programme. Hillier et Hanson (1984) proposent à ce sujet l'hypothèse du génotype inversée : lorsque les acteurs humains se proposent d'intervenir sur les formes urbaines (en extension ou en modification), les formes environnantes proposent des cadres de référence plus ou moins contraignants. Que ça soit par mimétisme ou par opposition, le programme est, au moins partiellement, dans l'environnement et donc dans la forme existant à un moment donné. Les contraintes posées par les plans de l'urbanisme réglementaire, ne font que formaliser les contraintes que la société urbaine souhaite poser sur la modification de la forme, compte tenu des formes existantes. Dans le passé, les mêmes phénomènes ont eu lieu de façon plus informelle, par une coordination culturelle qui n'était pas forcément de type juridique.

En même temps, le programme repérable dans l'environnement n'est pas complet, car la ville est un système adaptatif et un certain degré de liberté doit être laissé aux transformations futures. Il en reste pas moins que les dynamiques urbaines à chaque moment sont profondément « impliquées » par la forme actuelle et les transformations urbaines sont lourdement catalysées ou inhibées par cette dernière, ainsi que par la façon d'y parvenir selon un schéma de dépendance de trajectoire (*path dependency*). Les filtrages culturels (en matière de façon de concevoir et découper l'espace, de solutions esthétiques acceptées, d'assemblages permis ou interdits, que cela soit ou non formalisé par des documents d'urbanisme) sont précisément une manière de contraindre le changement de la forme par la culture urbaine ayant produit les formes précédentes. Bien évidemment, la question se complique dans la mesure où des nouveaux objets urbains apparaissent, pour lesquels une culture urbaine donnée n'avait pas codifié des solutions d'organisation spatiale. Cela a été le cas pour l'intégration des gares ferroviaires et des usines pour la ville du XIX^e siècle, et pour l'intégration des aéroports, des grandes surfaces commerciales ou des technopôles pour la ville de la seconde moitié du XX^e siècle. Il s'agit précisément des cas pour lesquels l'adaptativité des formes devient nécessaire, afin de permettre l'émergence de solutions issues de la créativité du système (Rabino 1998).

3.2 Les registres de la forme urbaine

La forme urbaine est un concept polymorphe et polysémique, témoignant de sa complexité

Une réflexion plus générale s'impose ici sur notre conceptualisation de la forme en géographie. Dans « Les mots de la géographie », Brunet et al. (2005) proposent deux conceptions différentes de la forme. La première est celle du sens commun, pour lequel la forme désigne la géométrie du contour externe d'un objet, sa silhouette que l'on perçoit de l'extérieur. Comme dans l'analyse d'un texte, la forme s'oppose ici au contenu et renvoie à ce qui est à la surface des choses, utile à leur reconnaissance mais pas nécessairement à leur compréhension. Une seconde conception a été historiquement fournie par l'école de la Gestalt allemande : la forme y est conçue comme rapport profond de relations internes entre les éléments spatiaux des objets, une catégorie qui impose ses déterminations. Cette forme comme structure interne s'oppose à la matière dont sont fait les objets : la forme c'est l'essence même des choses, le superficiel c'est la matière. En géographie on observerait alors une évolution historique de la discipline de la première conception de la forme (géographie comme description des formes du monde) à la seconde (géographie comme étude de l'organisation des formes, des rapports formes-fonctionnements, de la genèse des formes : géomorphologie, morphologie agraire, morphologie urbaine, etc.).

Appliquée à la ville, le concept de forme apparaît encore plus polymorphe. Pour A. Lévy (2005) la ville possède des formes diverses et des significations multiples : la forme urbaine pose d'entrée de jeu la question de sa définition. La complexité de l'objet forme urbaine permet différentes conceptualisations, selon le point de vue privilégié. Il en résulte un concept polymorphe et polysémique.

Lévy constate deux impasses dans les études sur la forme urbaine qui ne sont pas en adéquation avec cette complexité : la limitation de la forme urbaine uniquement à un point de vue exclusif et l'approche cloisonnée et sectorielle des diverses études spécialisées. Il propose ainsi cinq registres de la forme urbaine, portant chacun l'attention à un aspect de la réalité urbaine, et chargé, chacun, d'une signification particulière. Je prendrai la position de Lévy comme point de départ de ma réflexion, même si dans la suite je montrerai dans quelle mesure elle peut correspondre à l'articulation de mes recherches.

Le premier registre identifié par Lévy est celui de la forme urbaine comme **forme du paysage urbain** visuellement saisi dans sa tridimensionnalité et dans sa matérialité plastique (texture, couleur, matériaux, styles, volume, gabarits du bâti et des espaces publics). L'étude de cette forme urbaine possède une longue tradition : des travaux pionniers de C. Sitte (1889), au « *Townscape* » de G. Cullen (1961) à « L'image de la cité » de K. Lynch (1960). C'est ce que Pinon (1991) appelle l'approche du pittoresque. Plus récemment, se situent dans ce registre les travaux sur les ambiances urbaines (Thibaud 2002, Augoyard 2007). Sa signification, selon Lévy, est celle de la culture visuelle d'une société, de ses symboles visuels (représentation de valeurs politiques, civiques, religieux, marchands), de la lisibilité de l'espace (orientation), mais aujourd'hui également celui de la mise en valeur touristique des espaces urbains et du marketing urbain.

Le second registre est celui de la **forme sociale** de la ville (morphologie sociale), structure spatiale et formes d'occupation de l'espace liée aux différents groupes sociaux, ethniques, démographiques ou encore aux activités dans la ville. Une attention particulière est donnée au rôle des espaces publics et à celui des espaces résidentiels. La recherche renvoie ici à M. Halbwachs et à l'école de morphologie sociale française, à l'école de Chicago, à M. Roncayolo (1996, 2002) qui étudie le lien entre

morphologie sociale et production de la ville physique. En ce qui concerne l'attention au fonctionnement des espaces publics, je rajouterais également les travaux de J. Jacobs (1961) et, plus récemment de M. Bassand (2001) sur les espaces publics à l'ère de la métropolisation, ainsi que les recherches sur la gentrification des espaces urbains, lorsqu'elles s'intéressent à l'organisation spatiale de la ville. Si l'on accepte une vision beaucoup plus abstraite de l'occupation sociale et fonctionnelle de l'espace urbain (ce qui n'est pas forcément le cas dans Lévy 2005), les structures spatiales intra-urbaines produites par les modèles dynamiques des années 80 (Wilson 1981, Allen et al. 1981, Pumain et al. 1989), et par les plus récents modèles LUTI (*Land-Use Transport Interaction Models*, comme Batty et al. 2013), ou les patterns de spécialisation sociale des modèles de microsimulation (Portugali 2000), pourraient élargir à ce registre de la forme urbaine. La signification de cette forme urbaine est celle de la division socio-spatiale de la ville, des associations résidentielles et fonctionnelles acceptées ou évitées dans une société urbaine, de l'ancrage territorial de l'appartenance à un groupe social ou ethnique ainsi que celle des valeurs civiques qu'une société attribue aux espaces publics en tant qu'espaces de mixité. En devenant socio-fonctionnelle, cette morphologie se rapproche de l'organisation spatiale des fonctionnements humains de la ville, complémentaire mais distincte de la forme pour Alexander.

La **forme bioclimatique** de la ville caractérise l'espace urbain dans sa dimension environnementale. La question a été portée à l'attention du grand public depuis les premiers travaux sur l'environnement urbain (années 80) jusqu'aux plus récents débats sur le réchauffement climatique et sur le développement durable urbain (années 90 et 2000), mais la tradition en urbanisme est beaucoup plus ancienne si on y inclut les travaux des hygiénistes dès le XIX^e siècle (comme Richardson 1886). Plusieurs directions de recherche (avec recouvrements) se situent aujourd'hui dans ce registre de la forme urbaine : celle sur le microclimat urbain, la pollution et la santé dans la ville ; celle sur les écosystèmes urbains ; celle sur les métabolismes urbains (Coutard et Lévy 2010), incluant la production des déchets, les consommations énergétiques, le coût des différents formes en termes d'acheminements des services depuis le célèbre étude « *The Costs of Sprawl* » (RERC 1974) ; celle sur le lien entre forme urbaine et systèmes de transports, avec les recherches sur la périurbanisation et la densification urbaine en lien avec la dépendance automobile, l'utilisation des transports en commun et des modes doux et ainsi que les consommations énergétiques, comme dans Newman et Kenworthy (1998). La signification de cette forme est celle de l'attitude d'une culture urbaine vis-à-vis de la nature, de son milieu, de ses ressources ainsi que des solidarités spatiales et intergénérationnelles dans le cadre du développement durable.

La forme urbaine comme **forme des tissus urbains** est l'analyse de la typo-morphologie urbaine, à l'échelle d'un îlot, d'une rue, d'un quartier et portant sur les interrelations entre les éléments composant la ville physique : le parcellaire, la voirie, l'espace libre, l'espace bâti, le site. L'objectif de ces études a été traditionnellement double. D'un côté, essayer de comprendre la relation dialectique entre typologie des bâtiments et forme des tissus, ainsi que les processus historiques de production des formes observables au sein d'une culture donnée. De l'autre, obtenir des indications pour le projet urbain et architectural souhaitant intervenir sur des formes données. La forme des tissus urbains, comme nous le verrons, a été traditionnellement étudiées par les écoles architecturales italienne (Muratori, Aymonino, Caniggia, Rossi) et française (Depaule, Castex, Panerai, Borie, Denieul) ainsi que par l'école de la géographie urbaine anglaise (Conzen, Whitehand, Larkham). Ses significations portent sur une culture urbanistique et urbaine partagée par une société, sur le sens d'appartenance locale (quartiers) et également sur les pratiques de l'espace permises par les différentes formes des tissus.

Le dernier registre est celui de la **forme des tracés urbains**, forme géométrique du plan de la ville dans son ensemble (plan géométrique / organique, plan orthogonal / radioconcentrique) en rapport avec ses centralités (ville monocentrique ou polycentrique). Cette tradition de recherche est relativement ancienne en géographie au sein de l'école allemande de géographie urbaine (depuis la fin du XIX^e) et, en France, par les travaux de Pierre Lavedan. Dès le début de l'urbanisme, la théorie de l'urbanisation de Cerdà (1867), avec ses plans en damier, a été opposée aux plans organiques des cités jardins (Unwin 1909). Encore une fois la signification est celle d'une culture urbanistique et urbaine partagée par une société ainsi que la lisibilité de l'organisme urbain et métropolitain (orientation, sens d'appartenance) ; dans le passé, des valeurs symboliques fortes ont été liées à ce registre de la forme car les cosmogonies de grandes civilisations (de Rome à la Chine) ont été liées à la forme des tracés urbains.

Ce riche polymorphisme permet de saisir les directions prises par mes recherches sur la forme urbaine

Pour Lévy, c'est important de saisir la complexité de l'objet forme urbaine, sa véritable polymorphie et polysémie : il n'y a pas de forme physique (tissus, tracés) avec signification sociétale (morphologie sociale), pas d'aspects objectifs (forme bioclimatique) avec significations subjectives en termes d'ambiances... chaque registre de la forme a sa propre signification. En même temps, il est pratiquement impossible d'isoler chaque registre de la forme dans une analyse diagnostique. Les différents aspects sont liés entre eux, avec des renvois parfois évidents, parfois moins intuitifs. L'enjeu, autant scientifique que pratique (aménagement, urbanisme) est celui de mettre à système ces cinq registres et les significations associées pour parvenir à saisir la forme urbaine dans sa globalité.

Guidé par le riche polymorphisme du concept de forme urbaine proposé par Lévy, dans la suite de mon essai je me focaliserai sur les registres qui ont joué un rôle plus important dans mes recherches et sur les rapports qui peuvent s'établir entre eux ; je montrerai également qu'un sixième registre doit être rajouté. En extrême synthèse, pour guider mes lecteurs :

- Mon analyse de la forme physique de la ville se concentrera sur la forme des tissus et des tracés, en essayant, par ailleurs, de relier la première à la forme des paysages urbains visuellement perçus.
- L'analyse de la morphologie sociale de la ville sera également abordée, surtout à l'échelle d'une aire métropolitaine, et les liens avec la forme physique seront explorés. Dans la mesure où la morphologie sociale ouvre sur les fonctionnements urbains, l'analyse de ces liens me conduira à m'interroger sur les relations multiples pouvant exister entre la forme physique de la ville et l'organisation spatiale de ses fonctionnements socioéconomiques.
- Surtout, en m'interrogeant sur le lien entre forme physique et l'organisation spatiale des fonctionnements urbains, je montrerai que la forme des tissus et des tracés ne sera plus suffisante. Un nouveau registre, celui de la configuration de l'espace urbain (et notamment de ses réseaux, viaire et routier) sera nécessaire. C'est un registre provenant directement de l'analyse des réseaux complexes, et nécessaire pour apprécier le potentiel des propriétés spatiales de la ville à catalyser ou freiner certains fonctionnements socioéconomiques.
- Le registre de la forme bioclimatique restera hors du champ de cet essai. La forme bioclimatique et l'approche du métabolisme urbain avaient pourtant contribué à mes recherches de doctorat, au cours desquelles j'avais mis à système certains facteurs de forme physique avec l'organisation de la mobilité urbaine, la consommation de ressources et les pollutions.

3.2 Renouveler l'approche de la forme des tissus

La morphologie urbaine voit la forme urbaine complexe mais rechigne aux approches computationnelles

Les écoles classiques de la morphologie urbaine, et plus précisément de la typo-morphologie urbaine, en Italie, en Grande-Bretagne et en France, se sont essentiellement focalisées sur la forme physique de la ville, et notamment sur celle de ses tissus, en lien avec les processus historiques qui les ont produits. La forme des tracés y a été également abordée, notamment grâce aux apports de la géographie urbaine allemande (Schlütter, Geisler, Bobek, Louis, pour une synthèse voir Hofmeister 2004) et, en France, aux travaux de P. Lavedan (1926, 1936, 1960).

Au tournant des années 50 et 60, Muratori (1959), en Italie, et M.R.G. Conzen (1960), au Royaume Uni, introduisent un certain nombre de concepts clés pour la morphologie urbaine. Le premier concept que nous devons à Muratori est celui de **type architectural** : les bâtiments existants sont l'instanciation de types codifiés au cours du temps, dans des contextes culturels donnés, pour apporter une solution optimale à la production de structures bâties. Une grande attention est normalement donnée aux types architecturaux de base (types porteurs), constituant les solutions les plus répandues à une époque donnée et dans un périmètre géographique relativement restreint, à la production de bâtiments résidentiels (les bâtiments autres que résidentiels suivent des types spécialisés moins codifiés). Or les contraintes topographiques ou la présence d'une urbanisation plus ancienne font que les types se réalisent rarement à l'état pur, donnant naissance à des variations synchroniques des réalisations du type au sein d'un même espace urbain. L'évolution des besoins, des techniques et des processus de production font que les types se transforment au cours du temps donnant naissance à des variantes diachroniques du type et, au-delà de certaines limites, à des nouveaux types et à une nouvelle **période typologique** (intervalle de temps dans lequel un ou plusieurs types porteurs constituent la base de la nouvelle urbanisation). Le type architectural est en réalité en étroite interaction avec les structures foncières (le parcellaire) et le réseau viaire, de la sorte qu'une période typologique se caractérise également par certains rapports entre le bâti, le parcellaire et le réseau viaire. L'ensemble des mutations des typologies bâties, du parcellaire et des réseaux viaires constituent le **processus morphologique**.

L'approche typo-morphologique est en réalité multi-scalaire et ne se limite pas à l'évolution du seul bâtiment dans le cadre de sa parcelle de pertinence. Muratori (1959), Aymonino (1977) ainsi que Caniggia et Maffei (1979), soulignent que si les bâtiments peuvent être appréhendés en tant qu'instanciations de types architecturaux, l'agrégation de bâtiments, parcelles et éléments du réseau viaire permet d'identifier des **tissus urbains** types, caractérisant la façon de concevoir et produire des morceaux de ville par agrégation continue à une époque et dans une culture urbaine donnée. Des connexions typiques entre ces agrégats donnent naissances à des organismes urbains types ; finalement, à une échelle régionale, existeraient également des organismes territoriaux types caractérisés par des connexions typiques entre différents organismes urbains et entre ces derniers et les structures agraires et productives. Bien évidemment, l'identification de bâtiments et de tissus types est plus aisée que celle d'organismes urbains et territoriaux types, car les villes et les territoires réels assemblent normalement des structures héritées de périodes typologiques précédentes. Les villes réelles sont normalement un assemblage complexe de structures plus ou moins typiques ne relevant en tous cas pas de la même période typologique.

Pour Conzen (1960, 2004), l'objet d'étude de la morphologie urbaine est le **paysage urbain** (*townscape*), qui se compose d'un plan (réseau viaire, parcellaire, îlots), d'une trame bâtie et d'usages du sol. La coprésence de tissus différents et d'ensembles cohérents de tissus appartenant à une époque typologique donnée, est la règle dans les villes réelles. La **région morphologique** alors est un sous-espace du paysage urbain ayant des formes particulières, permettant de l'identifier et de le différencier des formes environnantes. Parmi les processus morphologiques permettant de comprendre les formes observables dans le présent des villes européennes, Conzen étudie plus particulièrement le *burgage cycle*, processus de comblement des îlots ordinaires, et la formation des **franges urbaines** (*urban fringe belts*), zones périphériques d'utilisation extensive de l'espace urbain pour l'accueil de fonctions et d'équipements variés (entrepôts, couvents, hôpitaux, agriculture urbaine, etc.) se formant à des époques et dans des espaces où l'extension résidentielle marque le pas. D'autres processus morphologiques sont également étudiés et systématisés par Conzen : processus additifs, réplétifs, transformatifs, etc. Une des questions de fond des recherches de Conzen est de comprendre comment une ville, avec une structure spatiale donnée, a pu acquérir cette articulation des formes au cours du temps. Il pose également la question de l'apport de l'étude des plans de ville actuels à la compréhension des dynamiques ayant produit un telle complexité et à celle du contexte spatial (ici régional) ayant joué un rôle dans ces dynamiques.

L'intuition de l'école italienne (Muratori d'abord, et ensuite Aymonino, Caniggia et Maffei) est qu'à **toutes les échelles, il existe des relations conditionnant les rapports possibles (et les transformations possibles) entre les différentes composantes de la forme**. A l'échelle d'un tissu c'est notamment le cas entre les logiques du parcellaire et des surfaces bâties et celles des réseaux viaires. Pour Caniggia et Maffei (1979), dans la morphogénèse urbaine, c'est le parcours à être primordial, parcours souvent matérialisé par un axe viaire. Cette structure axiale commande successivement, conjointement aux caractéristiques géométriques du type porteur de l'époque, le découpage du foncier urbain, l'orientation et l'agencement du bâti et, en interaction avec ces éléments, les développements successifs du réseau viaire. Une série de transformations multi-scalaires s'applique aux structures typo-morphologiques (règle des doublements, sérialisation, adaptation-transformation-accrétion-réplétion, tabernisation, etc.).

Une tendance générale identifiée à toutes les échelles est celle de la spécialisation des composantes avec la croissance du système (cela est vrai pour la spécialisation des pièces au sein d'un bâtiment, des parcelles et des bâtiments au sein des tissus, des axes et des quartiers au sein des organismes urbains, etc.), où la croissance s'opère souvent par dédoublement des formes existantes (dédoublement des pièces dans le processus typologique des bâtiments, des axes viaires, des tissus et des quartiers dans la croissance de l'organisme urbain, etc.). On pourrait même dire que cette tendance subit une accélération avec la métropolisation des espaces urbains.

L'apport de l'école française de morphologie urbaine, et notamment celle de Versailles organisée autour de Castex, Depaule et Panerai (Castex et al. 1980, Panerai et al. 1997), et celle de Paris, avec Borie, Micheloni, Pinon, Denieul et Fortier (Borie et al. 1980, Borie et Denieul 1984), a été la formulation d'une vision d'ensemble des relations explorées par l'école italienne. Il s'agit d'une véritable **dialectique entre deux grandes composantes du système morphologique**. La première est l'**infrastructure**, faite des caractéristiques topographiques du site, du réseau viaire et de la trame parcellaire. Il s'agit des éléments ayant la plus grande permanence historique, évoluant donc très lentement au cours du temps. La trame du bâti, des espaces vides et des éléments végétaux constitue en revanche la **superstructure** du système morphologique, au cycle de vie relativement plus court. Si, lors d'une première urbanisation, le découpage en lots est fonctionnel au type de bâti qu'ils

accueilleront, successivement ce sont les éléments de l'infrastructure qui conditionneront le développement de la superstructure. Et cela jusqu'au moment où le système morphologique n'est pas réinitialisé, suite à une destruction totale de la forme urbaine. L'étude de la ville de Versailles (Castex et al. 1980) montre clairement le rôle fondateur des tracés viaires et de la trame parcellaire dans la production des tissus urbains de la ville contemporaine. La différente temporalité des évolutions des composantes des tissus urbains est également partagée par Conzen.

Au sein de l'école anglaise, Kropf (2001) compare les transformations du processus typomorphologique avec la théorie darwinienne de l'évolution. Kropf oppose le processus évolutif phylogénétique qui est propre aux types architecturaux (régis par une véritable reproduction avec variation, suivi d'une double vérification de viabilité interne et externe) au changement des structures d'échelle supérieure (tissus et organismes urbains) qui feraient l'objet d'un développement ontogénétique qui ne constitue pas un véritable processus évolutif, mais plutôt adaptatif. De mon point de vue, le fait que l'évolution phylogénétique des types architecturaux ait lieu au sein de structures plus vastes fait que ces dernières acquièrent un niveau de complexité ultérieur, intégrant des processus à la fois d'évolution et de développement. **Tissus et organismes urbains doivent alors être étudiés comme des véritables écosystèmes en mutation, faisant coexister une multiplicité d'espèces, anciennes et nouvelles, poursuivant des trajectoires évolutives en interaction réciproque.**

Globalement, les trois écoles de la morphologie urbaine partagent une approche commune à la forme urbaine, ayant permis l'émergence d'une communauté scientifique autour du Séminaire International sur la Forme Urbaine (ISUF) et de la revue *Urban Morphology* (Vernez-Moudon 1997). Les points clés de cette approche sont les suivants : la structure spatiale de la ville, notamment la forme de ses tissus et de ses tracés, est l'issue plus ou moins ordonnée d'une longue histoire de changements incrémentaux de petite échelle. Les formes résultantes, observables aujourd'hui, ne sont pas simples, ni d'un point de vue géométrique, ni fonctionnel. Il est cependant possible d'identifier des structures typiques (les types architecturaux, les tissus urbains, les régions morphologiques), caractérisées par des agencements particuliers d'éléments de forme et par des contextes de production qui leur sont spécifiques et donnant lieux à des organismes urbains dont la forme globale, complexe, peut être appréhendée en étudiant les phases historiques de croissance et de tassement.

L'essentiel de la recherche typo-morphologique est en réalité focalisée sur l'identification et la description des types et de leurs transformations dans une approche monographique, avec une attention à la caractérisation des variantes synchroniques et diachroniques au sein d'un espace urbain donné. De surcroît, la morphologie urbaine classique a résisté aux approches computationnelles, analytiques ou de simulation. Le plan de recherche est toujours qualitatif et même les nombreuses mesures quantitatives des formes dans des cas d'étude concrets servent essentiellement de base à des interprétations plus holistiques des processus morphogénétiques au sein de l'histoire urbaine.

Une autre limite des recherches en typo-morphologie est celle de s'être focalisées sur l'analyse historique des transformations passées des formes urbaines traditionnelles. Pour l'école italienne d'architecture cela faisait partie d'un projet plus vaste de refus de la pratique architecturale courante et de refonte de la production architecturale basée sur une plus grande attention aux enseignements tirés de l'étude des processus typo-morphologiques passés. Cela a néanmoins porté à méconnaître le fait que même les plus récentes transformations urbaines citées en introduction du Chapitre 1 sont soumises à des processus de mutation typo-morphologique, tantôt en rupture, tantôt en continuité des processus passés, et en tous cas répondant aux changements des besoins de la production moderne des formes urbaines (besoins de rentabilité des initiatives de promotion immobilière résidentielle, tertiaire et commerciale, besoins d'intégration des nouvelles mobilités motorisées,

besoins de fonctionnements multi-scalaires liés à la métropolisation, etc.). A Lévy (1999, 2005) souligne alors le besoin d'ouvrir la recherche aux plus récentes transformations métropolitaines, remettant en discussion des paradigmes bien établis au cours de l'histoire urbaine. Il n'est pas surprenant que cette ouverture aux transformations plus récentes des structures urbaines et métropolitaines se trouve davantage auprès des auteurs nord-américains (voir par exemple Stanilov et Case Scheer 2004), confrontés à des réalités urbaines moins marquées par l'héritage de l'urbanisation traditionnelle. Parmi les nouveaux défis posés aux analyses morphologiques à l'ère de la métropolisation on pourrait alors citer : l'apparition de nouveaux types de tissus, la dialectique entre complexification de la mosaïque de tissus à l'échelle métropolitaine et la spécialisation/simplification de certains tissus de base, l'absorption au sein des tissus des nouveaux objets métropolitains, l'émergence de configurations métropolitaines, etc. Au niveau méthodologique, en revanche, le plus gros défi reste le raccord de la culture typo-morphologique classique avec les approches géocomputationnelles de l'analyse spatiale.

Le protocole MFA, ma contribution au renouvellement des recherches sur la forme des tissus par l'analyse spatiale computationnelle

Knox (1993), Ascher (1995) et A. Lévy (1999) concordent sur le fait que la croissance et les transformations métropolitaines des dernières décennies sont en train de produire **des nouveaux types de tissus urbains, compréhensibles seulement dans la réorganisation de l'espace urbain, mais coexistant avec les tissus plus traditionnels de la ville consolidée des centres et des banlieues anciens**. Pour comprendre l'organisation spatiale émergente de la métropole contemporaine, il faut alors avoir une vue d'ensemble des structures spatiales des tissus urbains sur tout le périmètre de l'aire métropolitaine. Mais cela n'est pas possible sans recourir à des algorithmes d'analyse spatiale permettant un certain degré d'automatisation dans le géotraitement des tissus urbains à une échelle qui échappe à l'analyse manuelle traditionnelle.

La littérature scientifique au cours des trente dernières années est riche de propositions méthodologiques pour le géotraitement de la forme urbaine. Les premières méthodes se sont focalisées sur des éléments sélectionnés du système morphologique urbain. La syntaxe spatiale de Hillier (Hillier et Hanson 1984, Hillier 1998), que je présenterai dans la Section 3.4, tout comme les recherches de Marshall (2005) se focalisent sur l'analyse de la morphologie des réseaux de rues. Berghauser-Pont et Haupt (2010) proposent une approche multivariée à l'analyse de la morphologie du bâti. En employant l'unité élémentaire de l'îlot, ils croisent différentes dimensions de la densité urbaine (intensité du bâti, compacité, ratio d'espaces ouverts et hauteur du bâti) pour identifier des typo-morphologies d'îlots urbains dans les villes contemporaines. La distribution de l'emprise au sol des éléments bâtis est également la principale préoccupation de l'analyse fractale de la forme urbaine de Frankhauser (1994) et Thomas et al. (2007).

Nous avons cependant vu que le concept de tissu urbain, proposé par les écoles traditionnelles de la morphologie urbaine, offre une vision beaucoup plus complète et multidimensionnelle de la forme physique de la ville : le tissu à la micro-échelle du fragment urbain et la région morphologique à une méso-échelle plus englobante sont des structures spatiales émergentes des relations entre bâtiments, parcelles, rues et site. La communauté scientifique est ainsi en train de proposer de nouvelles approches pour intégrer le caractère multidimensionnel des tissus urbains dans les algorithmes de l'analyse spatiale.

Les objectifs précis de l'analyse de la forme urbaine influencent inévitablement les descripteurs des tissus et les unités élémentaires de l'analyse. C'est une question de registres, dirait Lévy (2005).

Plusieurs recherches se posent ainsi dans le registre de la forme bioclimatique de la ville (comme Long and Kergomard 2005, Puissant 2010, Bernabé et al. 2013, Giannopoulou et al. 2015) : les îlots ou les approches raster qui superposent une grille abstraite à l'espace urbain y sont des unités d'analyse pratiques. L'îlot était également central dans les analyses traditionnelles des morphologues urbains : sa permanence historique permet une analyse diachronique plus aisée des formes bâties en son sein. L'îlot est ainsi privilégié par Gil et al. (2012) dans une approche de géotraitement.

Un objectif central pour l'analyse spatiale des formes physiques de la ville est l'identification des types de tissus urbains, nécessitant des algorithmes spécifiques. Pinho et Oliveira (2009) montrent le potentiel des plateformes SIG pour guider une analyse historique de la formation et transformation des tissus urbains et pour parvenir à des types de tissus. Mais l'identification des tissus conduite par ces auteurs dans les villes de Lisbonne et de Porto continue à être une interprétation qualitative de descripteurs quantitatifs des réseaux viaires, comme dans Marshall (2005). De même, Ye et Van Nes (2014) proposent une combinatoire de plages de valeurs de différents paramètres, englobants propriétés tissulaires et configurationnelles rapportées à un maillage raster, sans recourir à des procédures de clustering multivarié. Gil et al. (2012) et Bernabé et al. (2013) utilisent en revanche l'algorithme des nuées dynamiques (*k-means*) pour identifier des types de tissus urbains de façon inductive à partir de descripteurs morphologiques des îlots⁶.

Dans ce contexte j'ai ainsi proposée une nouvelle méthodologie d'analyse spatiale pour l'identification des tissus urbains appelée **Multiple Fabric Assessment** (MFA). Il s'agit de l'aboutissement des recherches sur l'analyse de la forme des tissus urbains dans un contexte métropolitain, conduites avec A. Araldi au cours de ces deux dernières années (Fusco et Araldi 2017a, Fusco et Araldi 2017b, Araldi et Fusco 2017). Tout en se posant dans la continuité des recherches sur le géotraitement de tissus urbains, l'approche MFA se différencie considérablement des solutions analytiques susmentionnées car elle adopte un point de vue très différent. Les analyses classiques des tissus urbains, la pratique professionnelle des aménageurs et les premières solutions de géotraitement présupposent toutes d'observer les tissus urbains vus du haut, à partir de leur plan. L'approche MFA veut en revanche caractériser les tissus urbains par rapport aux éléments qui peuvent être perçus par les piétons qui se déplacent sur la rue. En anticipant un peu sur le contenu des sections suivantes, **l'approche MFA enrichit la complexité du système morphologique urbain par la prise en compte des humains qui s'y déplacent et qui l'observent, comme postulé dans les approches configurationnelles de la syntaxe spatiale** (Section 3.4) **et comme proposé par Salingaros (2005) dans ses théories explicatives de la complexité morpho-fonctionnelle** (Section 3.5). Il s'agit également d'une façon de rapprocher le registre de la forme des tissus urbains à celui de la forme du paysage urbain visuellement saisi, même si l'analyse MFA se concentre sur les formes objectivement observables et n'aborde pas les questions des formes subjectivement perçues (comme dans la tradition de Lynch et de la psychologie environnementale urbaine).

L'approche MFA répond au besoin de nouveaux protocoles méthodologiques pour identifier et caractériser les tissus urbains dans leur complexité. Conscient que des objectifs différents peuvent aboutir à des choix méthodologiques différents, les objectifs précis que nous donnons à l'approche MFA sont de passer : (i) de calculs manuels à une méthode d'analyse spatiale par géotraitement ; (ii) du point de vue aérien du plan à celui du piéton depuis la rue ; (iii) de la reconnaissance de types de tissus préalablement identifiés par les experts à une procédure inférentielle depuis les données ; (iv) des analyses limitées à un quartier, à une petite ville ou à un secteur urbain, à celle de toute une aire

⁶ Gil et al. (2012) utilisent la même approche pour identifier également des types de rues, en décrivant ces dernières par des paramètres configurationnels.

3. Forme et organisation spatiale de la ville complexe

métropolitaine. Certains objectifs sont interdépendants : seulement un protocole automatisé d'analyse spatiale inférentielle à partir des données peut ainsi permettre d'analyser la vaste étendue spatiale d'une aire métropolitaine. L'approche MFA s'articule en trois étapes principales pour identifier et analyser les tissus urbains :

1. Des protocoles de définition d'unités spatiales élémentaires et de calcul par géotraitement d'une matrice d'indicateurs morphologiques pour les tissus urbains ;
2. L'identification d'associations spatiales dans les valeurs des indicateurs (structures locales) dans un espace réticulaire ;
3. Le clustering multivarié de ces structures locales par une méthode bayésienne pour identifier et caractériser des tissus urbains.

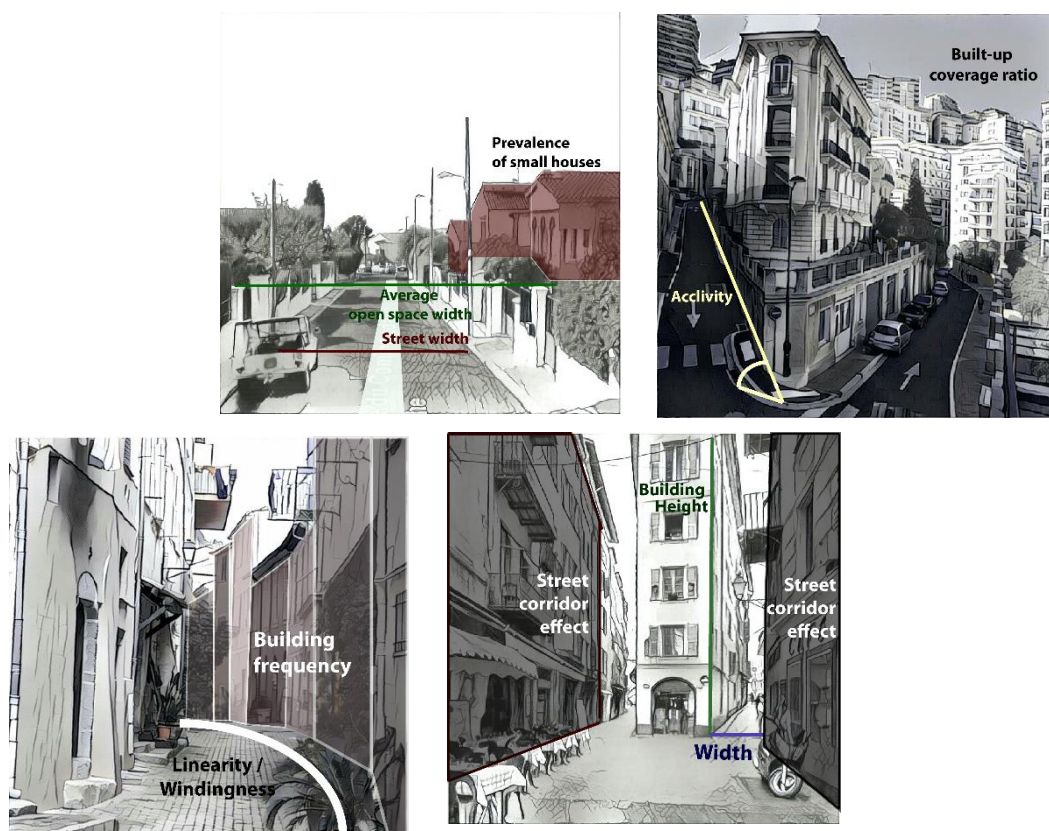


Figure 3.1 - Sélection de paramètres morphologiques mesurés dans la démarche MFA.

En ce qui concerne la première phase, **les unités spatiales élémentaires de l'analyse MFA sont définies en accord avec le point de vue du piéton** : elles sont des bandes de proximité autour de chaque segment du réseau viaire, avec une profondeur approximant l'espace visible selon l'élément de forme en question. Contrairement à la tradition des morphologues urbains, qui privilégient la décomposition en îlots de par son lien avec certains processus morphologiques transformatifs (comme le *burgage cycle*), la focale est ici sur le point de vue du piéton : depuis l'espace public ce dernier observe le tissu urbain sur les deux côtés d'une rue et pas sur les quatre côtés d'un îlot. C'est ainsi la rue⁷, avec les éléments bâtis et non bâtis qui la bordent, l'unité élémentaire de notre analyse, car elle

⁷ Plus précisément le segment de rue délimité par chaque intersection/bifurcation ou terminaison.

représente le principal canal de mouvement et de perception de la forme urbaine par les piétons. Ainsi faisant, les tissus urbains détectables seront implicitement définis en tant que structures spatiales filtrées par leur possible perception par les piétons.

Ensuite, pour chaque bande de proximité autour de la rue, sont calculés **des indicateurs morphologiques qui ont un sens pour la perception visuelle du piéton**, comme ceux visuellement représentés dans la Figure 3.1. Dans mes analyses j'ai retenu une batterie de 21 indicateurs morphologiques, abordant les différentes composantes du système morphologique urbain et les principales relations entre elles : la morphologie du bâti, celle des réseaux viaires, celle du site, les relations entre réseaux et bâti, entre réseau et parcellaire et entre réseaux et site. La morphologie du parcellaire contribue relativement moins à l'approche MFA que celle des autres composantes morphologiques, en considération de la moindre importance visuelle pour le piéton (seule la fragmentation parcellaire le long de la rue est prise en compte). Sa prise en compte pourrait en effet être renforcée si l'on souhaite mieux saisir l'apport des processus morphologiques aux tissus observables. En effet, l'apport de l'approche MFA, plus que sur le choix de tel ou tel indicateur, porte sur la démarche méthodologique dans son ensemble. Le choix des 21 indicateurs a été guidé par la focalisation sur les formes perceptibles et sur la disponibilité des données fournies par l'IGN en France (BD TOPO et cadastre numérisés). D'autres indicateurs pourraient être utilisés dans des contextes de recherche différents, guidés par la théorie de la morphologie des tissus urbains, par les objectifs précis de la recherche et par la réelle disponibilité des données, tout en suivant la démarche MFA.

À la différence des travaux susmentionnés (Pinho et Oliveira 2009, Gil et al. 2012, Bernabé et al. 2013), les indicateurs morphologiques ainsi calculés ne sont pas directement utilisés pour identifier des tissus urbains. Suivant la définition des écoles classiques de la morphologie urbaine, les tissus sont en effet des structures spatiales ayant la dimension minimale du petit fragment urbain émergeant de la répétition de certaines composantes de bases (des types de bâtiments, de parcelles, de rues, etc.) avec une certaine régularité d'apparition de relations spatiales typiques entre elles (mitoyenneté/séparation, distancement/proximité, alignement/désalignement, etc.). Pour que la dimension minimale du petit fragment soit atteinte, plusieurs segments viaires interconnectés doivent partager ces caractéristiques morphologiques. La significativité de ces associations doit être appréciée sous le double angle du nombre de segments contigus concernés et de la spécificité d'une caractéristique donnée par rapport à l'ensemble de l'aire d'étude. **Une phase d'analyse géostatistique est alors nécessaire.** Des regroupements spatiaux statistiquement significatifs de valeurs élevées et faibles doivent être identifiés pour chaque indicateur morphologie. **Pour prendre en compte la spatialité réticulaire de la ville et de ses tissus**, l'approche LINCS (*Local Indicators of Network Constrained Clusters*, Yamada et Thill 2007, 2010) est préférée au plus classique calcul des LISA (*Local Indicators of Spatial Association*, Anselin 1995) : les structures spatiales de valeurs des indicateurs doivent respecter la même connectivité dont fait expérience le piéton qui se déplace sur le réseau viaire.

Finalement, le clustering bayésien multivariée (voir Section 4.4) **a été employé pour obtenir une vision d'ensemble**, recomposant les 21 différentes facettes du système morphologique, saisies par chaque indicateur. Dans la Section 4.4, j'aurai occasion de souligner l'importance de la phase de l'analyse géostatistique comme préalable du clustering multivarié : nous voulons identifier une typologie de tissus urbains, qui sont des regroupements spatiaux d'unités spatiales élémentaires, et non une typologie de rues de la ville, indépendante de leurs rapports de voisinage. Le clustering bayésien a également de nombreux autres avantages par rapport aux approches multivariées plus traditionnelles (nuées dynamiques, k-médoïdes, etc.). D'abord, il permet d'utiliser les valeurs

catégorielles issues de l'analyse géostatistique (High-High, Low-Low, Non-Significatif, etc.). Ensuite, il respecte le caractère relativement incertain de l'identification des clusters et de l'assignation de chaque unité spatiale à un cluster donné, en utilisant une approche probabiliste (voir Chapitre 4 et, plus particulièrement Section 4.4). Finalement, les tissus urbains sont identifiés dès que les unités spatiales qui en font partie partagent de façon statistiquement significative un certain nombre de caractéristiques communes, mais ces unités spatiales ne sont pas forcées à être homogènes sur l'ensemble des 21 indicateurs morphologiques. De surcroît, les caractéristiques communes peuvent varier d'un tissu urbain à l'autre, ce qui est beaucoup plus en accord avec les résultats des analyses de morphologie urbaine plus classiques (Borie et Denieul 1984).

Première application du MFA : tissus et régions morphologiques de l'aire métropolitaine azurée

La méthode MFA a fait ses premières preuves. Elle a été capable d'identifier les types de tissus urbains et leur agencement spatial en régions morphologiques pour le cas d'étude réel de l'aire métropolitaine azurée. Mais, au-delà de la calibration de quelques paramètres morphologiques, la méthode n'a pas été conçue pour la seule étude du cas azurée et est parfaitement généralisable à d'autres contextes. Des recherches ont actuellement été lancées pour son application à d'autres contextes métropolitains méditerranéens (Marseille, Izmir) et extra-européens (Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Osaka).

La métropole azurée a cependant fourni un banc d'essai particulièrement instructif de par sa grande variété et enchevêtrement spatial des tissus urbains. Sur environ 1500 km² cet espace fournit une conjonction unique de paysages naturels et urbains : d'abord la topographie avec des espaces de plaine littorale, de fond de vallée, de colline et de montagne ; ensuite sa structure polycentrique et sa mosaïque d'influences historiques et culturelles sur son développement urbanistique : modèle vernaculaire liguro-provençal, influence de l'urbanisme piémontais sur la ville de Nice, interventions de l'urbanisme haussmannien d'abord, et moderne ensuite, sur l'ensemble des villes littorales, émergence de modèles périurbains et technopolitains ; finalement des contrastes très saisissants existent entre des secteurs particulièrement marqués par les politiques d'urbanisme, d'autres à plus forte tendance à l'auto-organisation urbaine et d'autres où les espaces naturels sont à peine mités par le bâti.

Le protocole MFA identifie neuf différentes familles de tissus urbains représentant des pourcentages différents des cent-mille unités spatiales **de l'espace métropolitain azurée**. Ces familles sont particulièrement bien définies et bien séparées dans l'espace de l'information mutuelle associé avec le clustering bayésien (voir Section 4.4). Leur nombre a été optimisé par les algorithmes de clustering bayésien⁸ et s'est révélé particulièrement robuste aux procédures de validation. Dans l'ordre de présentation dans la Figure 3.2, elles constituent un gradient continu d'intensité urbaine décroissante.

⁸ Différentes paramétrisations de l'optimisation bayésienne ont toujours produit le résultat des 9 clusters, avec sensiblement la même répartition des unités spatiales, indiquant une certaine robustesse de la solution fournie par les algorithmes bayésiens par rapport au contenu informationnel des 21 indicateurs utilisés. Des résultats très semblables ont également été obtenus par rajout/élimination d'indicateurs.



















Famille de tissu urbain	Poids dans l'aire d'étude		
1. Tissus urbains anciens contraints de maisons de ville			6.3%
2. Tissus urbains traditionnels de plaine de bâtiments mitoyens			9.3%
3. Tissus urbains discontinus et irrégulier de maisons et bâtiments			8.1%
4. Tissus urbains discontinus modernes avec constructions grandes et moyennes			15.5%
5. Tissus périurbains résidentiels de plaine et colline			19.8%
6. Tissus périurbains contraints aux petites maisons			12.4%
7. Tissus connectifs artificiels au grand bâti clairsemé et spécialisé			7.7%
8. Espace naturel de plaine/colline mité par maisons et immeubles			10.4%
9. Espace naturel de montagne mité par maisons et petits immeubles			10.8%

Figure 3.2 - Les neuf familles de tissus urbains de la métropole azurienne.

Dans l'interprétation du contenu de ces clusters, j'utiliserai le concept de « familles » de tissus urbains. Les clusters regroupent en effet souvent des tissus urbains légèrement différents, représentant des variations synchronique ou diachroniques d'un même type de base selon la théorie

3. Forme et organisation spatiale de la ville complexe

de Caniggia et Maffei (1979). Parfois des tissus urbains semblables peuvent également être produits dans des phases bien différentes de l'histoire urbaine. Ils sont néanmoins inclus dans la même famille car ils partagent les mêmes caractéristiques morphologiques clés qui définissent la famille. L'étude des caractéristiques précises de ces familles de tissus dépasse les objectifs de ce manuscrit. Je renvoie ainsi le lecteur intéressé à Fusco et Araldi (2017a) pour une analyse plus détaillée. Je me limiterai ici à une vision plus globale.

Aux familles bien connues des tissus urbains continus traditionnels (n° 1 et 2 de la Figure 3.2), des tissus urbains discontinus de la période moderne (n° 4, dont les villes azuréennes présentent également quelques exemples prémodernes) et des tissus périurbains (avec la particularité azurienne d'en posséder deux versions, différenciées par les types architecturaux les plus recourant et par le différent contexte topographique) l'analyse MFA de l'aire azurienne a permis d'ajouter d'autres familles moins ciblées par la littérature urbanistique. C'est le cas notamment de la famille n° 3 des tissus urbains discontinus et irréguliers de maisons et bâtiments, caractéristiques d'espaces fortement auto-organisés et ayant subi d'importants processus transformatifs. C'est également le cas de la famille n° 7 des tissus connectifs artificiels au grand bâti clairsemé et spécialisé. Il s'agit du type de tissus plus spécifique au développement métropolitain des quatre dernières décennies. Son importance quantitative n'est pas exceptionnelle (moins de 8% des segments viaires), mais il est présent dans presque toutes les aires périphériques des villes azuréennes et dans les interstices entre les autres familles de tissus urbains. Les tissus artificiels connectifs se trouvent souvent autour des grandes voies artérielles, des échangeurs autoroutiers et des ronds-points. Les plus grands bâtiments de l'aire métropolitaine (grandes surfaces commerciales, usines, hôpitaux, terminaux aéroportuaires, entrepôts, hangars) sont desservis par les segments de ce tissu, mais à une distance qui n'est pas à l'échelle du mouvement et de la perception du piéton. La plupart du parc technopolitain de Sophia Antipolis, au nord d'Antibes, est également caractérisé par la présence de ce nouveau type de tissu. Ces familles de tissus montrent également une certaine correspondance avec la typologie ABCD établie par Marshall (2005) sur la seule base des formes réticulaires. La famille n°1 correspond ainsi au type A (*Altstadt*) de Marshall, avec l'exception des bastides. Le type B (*Bilateral*) correspond à la famille n°2, le type C (*Characteristic/Conjoint*) à l'essentiel des familles n° 3 et 4 et le type D (*Distributory*) aux familles périurbaines n° 5 et 6. La famille n° 7 est un résultat beaucoup plus inattendu.

Projetés dans l'espace géographique, les clusters permettent d'identifier souvent des structures spatiales plus vastes que le microfragment nécessaire à la définition d'un tissu. Il s'agit de régions morphologiques de l'aire métropolitaine, au sens de Conzen (1961, 2004). La plupart de ces régions sont des vastes étendues d'une seule famille de tissus urbains. D'autres mélangent deux familles de tissus urbains relativement proches (comme les combinaisons 1-2, 3-4 et 5-6, parfois même 3-5). Des aires de mosaïques à graine fine de plusieurs familles différentes sont particulièrement rares. L'approche MFA apporte ici une contribution au besoin depuis longtemps exprimé de plus de clarté dans l'identification des régions morphologiques (voir, par exemple, Larkham et Morton 2011).

La Figure 3.3 montre la section occidentale de l'aire métropolitaine, autour de Cannes, Antibes et Grasse (haut) et la partie centrale, autour de la ville de Nice (bas). Les vieux centres-villes d'Antibes, Nice et Cannes (tout comme Grasse dans le moyen-pays) sont bien reconnaissables en marron (famille n° 1), entourés par les tissus urbains traditionnels de la fin du XIX^e et de la première moitié du XX^e (famille n° 2).

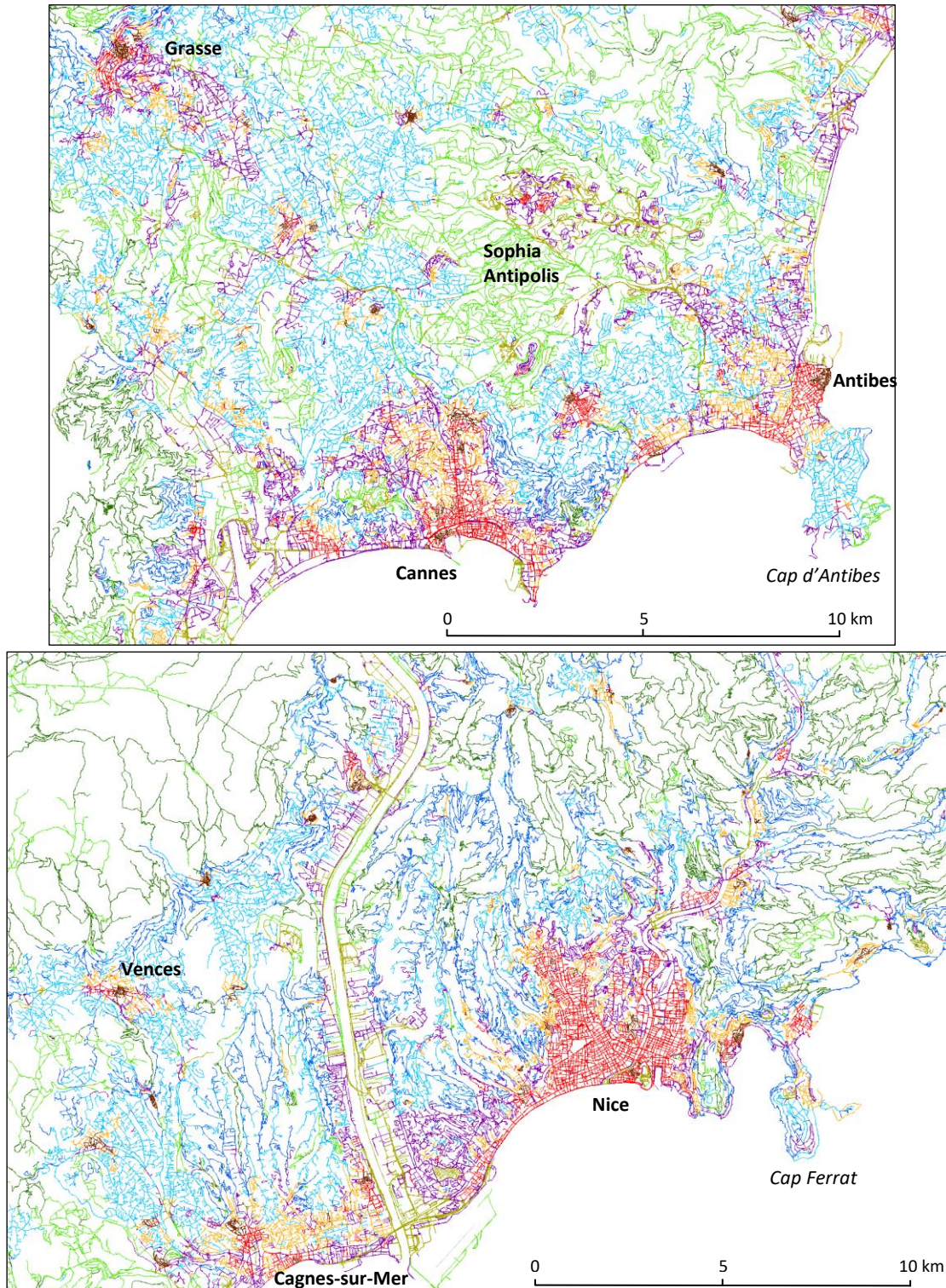


Figure 3.3 – Les familles de tissus urbains azuréens projetées dans l'espace géographique.

Des secteurs urbains plus périphériques appartiennent aux familles n° 3 et 4, souvent dans des secteurs spatialement opposés, tandis que des vastes espaces périurbains (notamment la famille n° 5 autour d'Antibes et Cannes et à l'ouest de Nice, mais n° 6 au nord et à l'est de Nice) bordent ces périphéries.

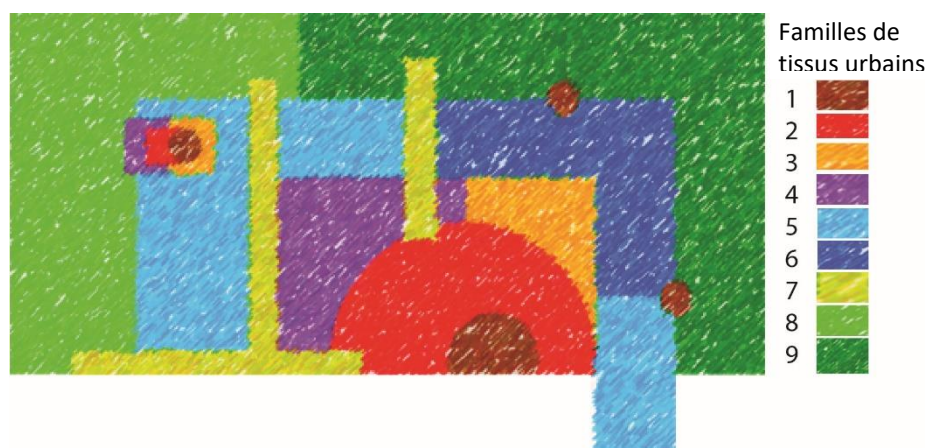


Figure 3.4 - Organisation spatiale archétypique des régions morphologiques dans les villes azuréennes.

La famille n° 5 caractérise également les caps (d'ouest en est : l'Estérel, le Cap d'Antibes, le Cap Ferrat, le Cap d'Ail, le Cap Martin). Les tissus urbains anciens des villages environnants sont identifiables comme des îles dans le périurbain. Finalement, les tissus urbains connectifs artificiels correspondent aux franges urbaines à l'ouest de Nice et de Cannes et au nord d'Antibes (souvent à côté des tissus modernes) ainsi qu'aux espaces techniques des ports et des aéroports, et au cœur de l'espace technopolitain de Sophia Antipolis (où deux villages tout-à-fait récents montrent les caractéristiques morphologiques des tissus plus traditionnels). Les résultats produits par les algorithmes MFA pour la ville de Nice montrent une région morphologique continue de tissus urbains traditionnels de plaine qui, à partir du centre-ville, se développe vers le nord et l'est, ainsi que l'importance des tissus modernes discontinus à l'ouest et au nord, sur les collines de Cimiez et Rimiez. Ces résultats concordent avec les analyses plus qualitatives, mais attentives à l'histoire urbaine, disponibles dans la littérature (Graff 2000, 2014).

Les similitudes frappantes dans l'organisation spatiale des régions morphologiques autour des villes littorales de Cannes, Antibes, Cagnes-sur-Mer, Nice, Monaco et Menton nous ont conduits à la conclusion que, en dépit des spécificités locales (comme la trame urbaine planifiée de Nice ou les tours contraintes par la frontière et la topographie à Monaco), **les villes azuréennes montrent un génotype commun d'organisation spatiale**. Ceci est représenté par le croquis de la Figure 3.4. La ville azurée archétypique possède, au centre, un double noyau concentrique de tissus anciens et de tissus traditionnels prémodernes. Des tissus discontinus irréguliers et des tissus discontinus modernes se développent dans des secteurs bien différenciés autour de ces espaces centraux. Encore plus loin, différentes formes de tissus périurbains ont été ajoutées dans les cinq-six dernières décennies, avec des formes spécifiques et plus anciennes sur les caps prestigieux. Une ceinture ultérieure d'espaces naturels à peine mités et plus ou moins topographiquement contraints s'étend autour des tissus périurbains. Cependant, l'organisation spatiale de l'aire métropolitaine ne peut pas être comprise sans intégrer les aspects suivants :

- Le proche arrière-pays est parsemé d'anciens villages, ou de petites villes (Grasse, Vence) qui ont alors, à leur échelle, la même juxtaposition de formes urbaines déjà observée pour les villes littorales.
- Les tissus connectifs artificiels sont une nouvelle forme urbaine, spécifique au développement métropolitain des cinq dernières décennies. Ils se situent dans les interstices des périphéries urbaines et du périurbain, le long des principaux axes routiers et parfois sur le littoral même,

connectant les ports, les aéroports, les centres commerciaux de périphérie et les autres grands équipements métropolitains.

- Ce schéma est un module répété plusieurs fois au sein de l'aire métropolitaine et autour de chaque grande ville littorale. L'organisation spatiale de la métropole azurienne est ainsi une structure doublement autosimilaire : répétition du même module à l'échelle spatiale de la métropole le long du littoral, et répétition d'une version en miniature dans le proche arrière-pays.
- La technopole de Sophia Antipolis constitue une région morphologique à part, où des tissus discontinus modernes et des villages récents aux typologies traditionnelles sont insérés dans une matrice de tissus connectifs artificiels, et l'ensemble est entouré par des espaces naturels collinaires.

Globalement, un schéma urbain articulant noyaux et ceintures concentriques avec des secteurs, entremêlé avec des nouveaux tissus connectifs, se répète plusieurs fois au sein d'une aire métropolitaine polycentrique, avec une certaine autosimilarité à différentes échelles.

En conclusion, la méthode MFA est une procédure inférentielle et *data-driven* d'identification et d'analyse des tissus urbains, couplant le calcul d'indicateurs morphologiques, l'analyse géostatistique des structures spatiales et le clustering multivarié bayésien. Elle est apte à appréhender la complexité de la spatialité des tissus urbains à la micro-échelle du fragment urbain. Appliqué à la métropole azurienne, le MFA s'est montré capable d'identifier neuf familles de tissus, particulièrement bien définis en termes de caractéristiques morphologiques. Projetées dans l'espace géographique, ces familles définissent des régions morphologiques, qui s'articulent à leur tour dans l'organisation spatiale de l'aire métropolitaine. Cette dernière est complexe car elle est l'issue de l'auto-organisation de la croissance métropolitaine et présente des caractéristiques de modularité de d'autosimilarité.

L'application ici présentée de la méthode MFA est une analyse transversale des formes urbaines et métropolitaines à un moment donné de l'histoire. La grande permanence historique de l'infrastructure morphologique (réseaux viaires, parcellaire, topographie) au-delà du renouvellement du bâti et du comblement des espaces vides permet d'inférer les grandes lignes de la morphogénèse de la métropole, avec la superposition et/ou juxtaposition de formes nouvelles qui viennent rarement effacer les plus anciennes. La **perspective d'une application diachronique de la méthode** à différentes dates de l'histoire urbaine et métropolitaine reste néanmoins ouverte. Elle devrait permettre de reconstruire de façon plus détaillée les phases du processus morphogénétique et de mieux comprendre le devenir à la fois de la forme des tissus et de l'articulation spatiale des régions morphologiques. Une **définition plus ample du système morphologique** peut également venir parfaire la méthode. Les éléments végétaux constituent par exemple une composante morphologique à plein titre avec le parcellaire, la voirie et le bâti et font l'objet d'une attention croissante de la part des urbanistes et des usagers (Long et Tonini 2012, Mehdi et al. 2012). Ils pourraient ainsi être intégrés dans la batterie des indicateurs morphologiques du protocole MFA. D'un point de vue méthodologique, une **meilleure exploitation du contenu probabiliste des analyses** devrait également porter à mieux intégrer le caractère incertain des connaissances produites (voir Chapitre 4). La focalisation sur le point de vue du piéton dans l'observation des formes urbaines peut également ouvrir des perspectives très intéressantes dès lors que la recherche se penche sur les **relations entre formes et fonctionnements humains de la ville**, en complément de ce qui sera présenté dans la section suivante.

3.4 De la forme des tissus à la configuration

La configuration, nouvelle approche à la forme urbaine en lien avec l'analyse des réseaux complexes

Dans son article fondateur, Lévy (2005) évoque rapidement la nouvelle approche computationnelle à la forme urbaine proposée par l'école de B. Hillier (Hillier et Hanson 1984, Hillier 1996), qui prend le nom de syntaxe spatiale (*space syntax*). Il y voit une tentative de renouveler les approches de la forme des tissus par l'introduction de la computation informatique et par le renversement du point de vue, qui met au centre l'espace vide du mouvement piéton. Effectivement, le géotraitement et la prise en compte du point de vue du piéton peuvent renouveler l'analyse de la forme des tissus, mais cela est fait plus précisément par l'approche MFA, que je viens d'exposer dans la section précédente. En revanche, les approches computationnelles auxquelles la syntaxe spatiale participe, mais qui vont au-delà des seuls travaux de l'école d'Hillier, constituent, pour reprendre la logique de Lévy, **un véritable nouveau registre de la forme urbaine, celui de la configuration**.

Le registre de la configuration dérive historiquement à la fois de la tradition de la morphologie urbaine et de celle de la communauté des réseaux complexes, qui s'était déjà tournée vers les sciences sociales au cours des années 70 avec la sociologie structurelle de Freeman (1977, 1979). Il s'agit effectivement d'une approche computationnelle qui passe par la modélisation d'un graphe du réseau, car les algorithmes et la puissance de calcul de l'ordinateur sont fondamentales pour calculer les paramètres configurationnels.

D'un point de vue historique, le trait d'union entre les approches classiques de la morphologie urbaine et les approches configurationnelles ont été les travaux de l'école de Cambridge du *Center for the Land Use and Built Form Studies* (Martin et al. 1972). Ces auteurs introduisent la géocomputation de l'analyse sur graphe pour caractériser les formes urbaines et, plus particulièrement, les configurations des connections topologiques. Successivement Steadman (1983) montre le potentiel de ces approches de géo-computation configurationnelle en architecture, introduisant la troisième dimension à l'échelle des bâtiments. Entre les années 80 et 90 le centre des approches géocomputationnelles et configurationnelles passe de Cambridge à Londres, et plus particulièrement à la *Barlett Graduate School de l'University College of London* (UCL), où le groupe de B. Hillier (Hillier et Hanson 1984, Hillier 1996, 2002, 2012, Hillier et al. 1993, Hillier et Iida 2005, Penn et al. 1998, Turner 2000, 2007) fonde la syntaxe spatiale. La syntaxe spatiale se diffuse successivement à l'extérieur du périmètre britannique, notamment aux Etats Unis, grâce aux travaux de J. Peponis à la *Georgia Tech School of Architecture* (Peponis et al. 1997), en Italie, par les travaux de Valerio Cutini à l'Université de Pise (Cutini 1999, 2001, 2003, 2010, Cutini et al. 2005), et encore au Japon (Asami et al. 2003, Kigawa et Furuyama 2005, Kigawa et Seo 2009), en Suède (Jiang et Claramunt 2004), au Brésil (Figueredo et Amorim 2004, 2005), en Israël (Omer et Gabay 2007, Omer et Zafir-Reuven 2010, Lerman et al. 2014, Omer et Goldblatt 2016), etc. En France, la syntaxe spatiale est venue féconder surtout l'étude des mobilités urbaines (Piombini 2006, Foltête et Piombini 2007, Foltête et al. 2008) auprès des géographes de Besançon et de Strasbourg.

Contrairement au registre de la forme des tissus, l'analyse configurationnelle se focalise sur le seul réseau viaire, différemment modélisé en graphe, selon le type d'analyse conduite. Il s'agit ainsi d'une approche configurationnelle des réseaux urbains. Les réseaux y sont vus comme les canaux physiques du mouvement humain susceptibles, par leur configuration, de catalyser, d'empêcher ou de permettre le contrôle du mouvement potentiel des usagers de la ville. Les éléments physiques qui les composent sont ainsi d'abord des transformations de l'espace du mouvement et de la rencontre : le mouvement

naturel, de tout point à tout point, est canalisé et structuré par ces réseaux de connexions physiques (Hillier et al. 1993, Hillier 1996). On y retrouve les principes de l'auto-éco-organisation de Morin : le système complexe présente une augmentation corrélative de l'ordre (les macro-formes observables) et du désordre (le mouvement aléatoire de tout point à tout point) par le biais de l'organisation (la configuration des réseaux). Le réseau urbain (*urban grid* dans la définition de Hillier) est en soi un système complexe : en se connectant les uns aux autres, les éléments du réseau forment un système, fournissant à chacun d'entre eux des propriétés spatiales qui ne découlent pas de ses propres caractéristiques, ni (au moins directement) des connexions avec ses voisins immédiats (comme dans les tissus urbains).

Un concept fondamental pour l'analyse configurationnelle est celui de **distance universelle** (*universal distance* dans Hillier 2012) qui est une première propriété configurationnelle : la distance (totale ou moyenne) entre tout couple de lieux au sein d'un système spatial se substitue à celui de la distance simple entre deux lieux. Les positions réciproques des éléments est essentielle dans le calcul de la distance universelle. Ainsi, si l'on interpose un objet au sein d'un système d'espaces vides (ici des cellules), délimité par deux autres objets physiques, la position de l'objet interposé modifie la variation de la distance universelle entre les cellules vides (Figure 3.5).

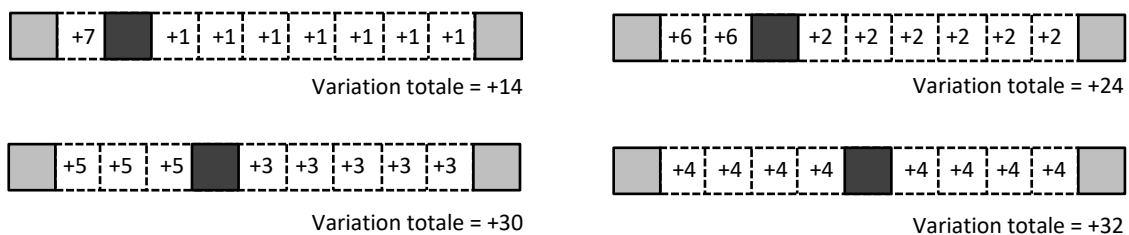


Figure 3.5– Variation de la distance universelle totale par l'interposition d'un objet (depuis Hillier 2012).

Plus l'objet se positionne au centre du système d'espaces vides et plus la distance universelle est pénalisée (même si elle se répartit de manière plus égalitaire entre les éléments spatiaux). Ce principe est vrai également pour les mesures d'inter-visibilités et dérive du fait que la distance universelle (topologique, métrique ou visuelle) s'obtient en calculant le carré du nombre des éléments spatiaux du système. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne d'une configuration symétrique où deux fois le nombre de connexions n^2 est pénalisé par la présence de l'obstacle, on obtient des configurations de moins en moins pénalisées en termes de distance universelle, car :

$$2n^2 > 2(n-x)(n+x)$$

Cette formule, est une différente manière de formaliser la **loi des carrés pour l'espace configurationnel** proposée par Hillier (2012). Les **propriétés spatiales dites configurationnelles** dérivent de l'ensemble des relations que chaque élément de forme établi avec tous les autres éléments, éventuellement à l'intérieur d'un rayon d'interaction donné. Elles sont, de ce point de vue, des **propriétés émergentes**, qui ne sont pas contenues dans les règles de connexion élémentaires. Or, les valeurs de ces propriétés configurationnelles se distribuent avec une certaine logique dans l'espace, permettant de caractériser les villes et leurs sous-espaces par la distribution spatiale de leurs propriétés émergentes (voir Section 3.5).

Ces points différencient particulièrement l'approche configurationnelle de celle des tissus urbains. Pour résumer, l'analyse des tissus est multidimensionnelle (elle intègre le bâti, les parcelles, les rues,

la topographie), mais se concentre sur les relations spatiales de voisinage entre les éléments de forme. Elle favorise une échelle d'analyse (celle du petit fragment urbain) et nécessite une recombinaison qualitative (l'identification des régions morphologiques et de leur agencement) pour aborder des échelles géographiques plus vastes. L'analyse configurationnelle se focalise uniquement sur le réseau viaire mais est par nature multi-scalaire et vise à identifier les propriétés émergentes des interactions potentielles des éléments qui découlent de leur positionnement réciproque dans l'espace urbain.

Hillier (1996, 2012) donne également à l'approche configurationnelle des objectifs scientifiques dans la compréhension des fonctionnements de la ville. Il ne s'agit pas seulement d'une recherche théorique, visant à vérifier si des propriétés qui caractérisent toutes les structures auto-organisées peuvent être retrouvées dans les villes. Il s'agit de mieux appréhender les fonctionnements urbains à partir de la spatialité de la ville. Si les villes sont des économies de mouvement (Hillier 1996), comprendre les logiques spatiales de ce mouvement est essentiel pour comprendre le fonctionnement socioéconomique de la ville. Le mouvement serait ainsi davantage la conséquence de la spatialité des réseaux, et les activités humaines dépendantes de ce mouvement (les fonctions commerciales, les services, les fonctions symboliques de la centralité urbaine, ou encore les valeurs immobilières, le crime, les rassemblements spontanés de population, etc.) seraient ainsi, dans leur localisation, très sensibles aux propriétés configurationnelles de l'espace urbain. Contrairement à l'approche mécaniste des modèles de transports, ce n'est alors pas la localisation des fonctions dans l'espace urbain à déterminer les flux. Au contraire c'est la spatialité des réseaux qui structure le flux du mouvement, créant ainsi indirectement des opportunités et des contraintes pour la localisation des fonctions.

Batty aussi fonde la nouvelle science des villes sur une approche configurationnelle : « En bref, notre argument pour une nouvelle science est basé sur la notion que, pour comprendre un lieu, nous devons comprendre les flux et que, pour comprendre les flux, nous devons comprendre les réseaux. À leur tour, les réseaux suggèrent des relations entre les hommes et les lieux, et ainsi les principes centraux de notre nouvelle science dépend de relations essentielles entre les objets qui constituent le système qui nous intéresse [...]. L'idée que c'est la relation – ou, mieux, le réseau – entre les lieux et les espaces, et non les attributs intrinsèques du lieu et de l'espace, qui conditionnent notre compréhension, est le premier principe que nous utiliserons dans notre nouvelle science » (Batty 2013, p. 20)⁹.

« L'idée clé est que les réseaux, qui sont plus étroitement intégrés dans la structure physique bi- (et peut-être tri-) dimensionnelle de la ville que les flux, représentent les structures sur lesquelles les flux ont lieux. Ces derniers, à leur tour, reflètent les processus qui permettent à la ville de fonctionner socialement et économiquement » (ibid. p. 26)¹⁰.

Dans la suite de son ouvrage, Batty pose explicitement le défi de voir les localisations dans la ville comme la résultante, complexe, de *patterns* d'interaction. Il rejoint ainsi Hillier dans le renversement de la logique classique des modèles de transport : ce n'est pas la localisation des fonctions qui détermine les flux sur le réseau viaire, c'est la configuration du réseau qui détermine des flux potentiels et, par-là, la localisation de certaines fonctions très sensibles à la spatialité de ces flux.

⁹ Ma traduction.

¹⁰ Ma traduction.

L'approche configurationnelle informe une grande richesse de protocoles d'analyse

La syntaxe spatiale n'est pas la seule approche configurationnelle possible. Dans un récent article (Fusco et Tirico 2016) j'ai proposé une exploration plus systématique des différentes techniques configurationnelles.

À première vue, la littérature scientifique identifie deux grandes familles d'analyses configurationnelles (Porta et al. 2006a, 2006b). La première est basée sur les distances métriques sur les réseaux physiques et utilise un graphe primal du réseau viaire, où les intersections sont des nœuds et les segments viaires des arcs. Le *Multiple Centrality Assessment* (MCA, Porta et al. 2006a, 2010) est la technique plus usitée de cette approche primale. La seconde approche est basée sur une distance topologique sur le graphe dual du réseau viaire, où les éléments linéaires (rues, axes visuels, etc.) sont des nœuds et leurs intersections sont des arcs. L'analyse axiale de la syntaxe spatiale (Hillier et Hanson 1984, Hillier 1996) est un exemple typique de cette approche duale. Selon Porta et al. (2006a) et Ratti (2004) l'approche primale devrait être préférée dans les analyses configurationnelles. Une fois éliminés les effets de bord, l'approche primale identifie les structures centrales au sein des réseaux viaires par le seul biais du calcul configurationnel (là où l'identification des éléments dans l'approche duale implique déjà une bonne partie des résultats de son calcul configurationnel), produit des indicateurs plus différenciés pour décrire les différents aspects de la centralité et intègre la distance métrique, qui respecte plus fidèlement les propriétés physiques de l'espace urbain. Jiang et Claramunt (2004), et même Porta et al. (2006b), reconnaissent en revanche le grand potentiel de l'approche duale pour identifier l'organisation du réseau viaire en tant que système complexe. Si pour les seconds, l'approche primal continue à être supérieure dans le calcul configurationnel, les premiers considèrent que les caractéristiques topologiques qui sont au centre de l'approche duale ne sont pas moins réelles que les distances physiques de l'approche primale. Il s'agit seulement d'une différente modélisation du réel, qui favorise la compréhension de certaines propriétés plutôt que d'autres.

De mon point de vue, la différenciation entre modèle primal et dual du graphe du réseau viaire est un clivage fondamental parmi les techniques configurationnelles. Il n'est cependant pas le seul. Il faut également considérer deux autres aspects méthodologiques. Le premier est le choix des entités du réseau. Il y a au moins quatre options différentes : les éléments topologiques (définis par des connexions qui sont insensibles aux déformations et à l'agrandissement/réduction de l'espace urbain), les éléments angulaires (définis par des directions qui sont insensibles à l'agrandissement/réduction mais ne résistent pas aux déformations), les éléments dimensionnels (segments d'une longueur donnée, sensibles à la fois aux déformations et à l'agrandissement/réduction) et les éléments socialement définis (comme les noms des rues et toute autre délimitation cognitive et sociale des éléments, qui dépendent de la représentation sociale de l'espace urbain). **Le second aspect est celui de la manière de considérer la distance entre éléments du réseau** : il peut s'agir d'une distance topologique (nombre de connexions, quelle que soit la nature des connexions), angulaire (modélisant l'impédance psychologique au changement de direction pendant le mouvement) ou dimensionnelle (distance métrique ou temporelle sur le réseau, modélisant l'impédance au mouvement physique). Le Tableau 3.1 est une vue d'ensemble systématique de différentes techniques configurationnelles que l'on peut retrouver dans la littérature, en les positionnant par rapport à ces trois grandes dimensions méthodologiques. Certaines combinaisons semblent plus problématiques que d'autres (par exemple, le calcul d'une distance angulaire sur le graphe primal ou celui d'une distance dimensionnelle sur un graphe dual). Certaines techniques mélangent les options (même le calcul de la distance pourrait combiner les différentes options identifiées). On notera que les approches primales peuvent facilement intégrer les bâtiments

comme points d'origine/destination du calcul configurationnel (Sevtsuk et Mekonnen 2012). Même si l'analyse configurationnelle reste focalisée sur les propriétés des réseaux, elle peut ainsi intégrer l'influence d'une autre composante de la forme urbaine. L'approche duale aussi a subi différentes améliorations pour adhérer de manière plus stricte à la réalité morphologique. C. Lagesse (2015) perfectionne ainsi la méthode ICN (*Intersection Continuity Negotiation*) proposée par Porta et al. (2006b). Elle parvient à la construction d'un nouvel objet géographique, la voie, constituée de segments interconnectés subissant des écarts angulaires suffisamment petits aux intersections. En privilégiant une forme de continuité locale, la voie crée une structure cohérente à toutes les échelles et peut faire l'objet d'une modélisation en graphe duale qui s'affranchit des contraintes de l'alignement visuel absolu de la syntaxe spatiale. Cette méthode peut ainsi modéliser la Promenade des Anglais à Nice comme étant un élément unique, et non pas une suite de cinq ou six axes visuels enchaînés.

Dans Fusco et Tirico (2016), nous nous sommes ensuite focalisés sur la comparaison de trois techniques d'analyse configurationnelle bien établies : l'analyse axiale de la syntaxe spatiale (Axial SSx), le *Multiple Centrality Assessment* (MCA) et le *Mark Point Parameter Analysis* (MaPPA). Les éléments du réseau de l'Axial SSx sont l'ensemble des lignes visuelles maximales que l'on peut tracer dans l'espace public du mouvement piéton (Hillier et Hanson 1984, Hillier 1996) : ils sont ainsi définis de façon angulaire, car c'est le changement de direction qui définit l'élément. La distance sur le graphe (qui est de nature duale) est ensuite topologique : on compte à combien d'intersections un axe se trouve d'un autre axe. Les éléments de la MCA, comme définis par Porta et al. (2006a) sont en revanche topologiques et sont modélisés par un graphe primal : chaque intersection ou bifurcation délimite un nouveau segment. Dans Fusco et al. (2015) j'ai également rajouté un critère dimensionnel : chaque fois qu'une distance maximale est atteinte, on divise un long segment dans des segments plus courts. La technique MaPPA, proposée par Cutini et al. (2004) est particulièrement intéressante car elle définit les éléments du réseau en mélangeant des considérations topologiques, angulaires et dimensionnelles : les éléments linéaires sont délimités par chaque intersection du réseau, par chaque changement directionnel majeur (comme dans une rue tortueuse) ou chaque fois qu'une distance maximale est atteinte.

Avec le recul de vingt ans d'analyse configurationnelle selon l'approche duale, Hillier et Iida (2005) concluent au fait que l'analyse axiale peut être à son tour améliorée si l'on considère la distance angulaire au sein du réseau de lignes visuelles : c'est la technique de l'analyse angulaire de Turner (2000). Dans la corrélation avec les flux de piétons et de véhicules mesurés au sein de plusieurs *boroughs* londoniens, les paramètres configurationnels de l'analyse angulaire sont ainsi souvent supérieurs à ceux de l'analyse axiale (selon l'approche classique de Hillier et Hanson 1984) et, en tous cas, toujours supérieurs à ceux de mesures métriques dimensionnelles effectuées sur les mêmes lignes visuelles.

À partir de ces grands choix méthodologiques, les différentes techniques utilisent des vocabulaires qui leur sont propres pour désigner les différentes propriétés configurationnelles. Plus particulièrement, le MCA emploie les paramètres proposés par Freeman (1977, 1979) dans ses recherches sur les réseaux sociaux. Les techniques de la syntaxe spatiale utilisent en revanche les termes développés par Hillier et Hanson (1984). En réalité, au-delà du degré du nœud qui, tout en portant le même nom, indique des propriétés différentes sur un graphe primal (nombre de segments convergeant sur une intersection) et sur un graphe dual (nombre d'intersections sur un même axe), les autres indicateurs configurationnels sont tout-à-fait comparables lorsque l'on fait abstraction des différences de vocabulaire.

	GRAPH MODEL	Primal			Dual		
	NETWORK DISTANCE	Topological	Angular	Dimensional	Topological	Angular	Dimensional
ENTITIZING OF NETWORK ELEMENTS	Angular				Axial Analysis (Hillier, Hanson, 1984)	ICN (Porta, Latora, Cardillo, 2006)	Angular Analysis (Turner, 2000)
	Topologic	Ma.P.P.A. * (Cutini, Petri, Santucci, 2004)		M.C.A. * (Porta, Latora, Cardillo, 2006)	Road-centre Lines Analysis (Turner, 2007)		Continuity analysis (Figueiredo, Amorim, 2005)
	Dimensional			M.C.A. * (Fusco, Cagliioni, Araldi, 2016)			
	Socially defined				Street Name (Jiang, Claramunt, 2004)		

* Implementation with buildings possible Techniques which will implemented in the paper

Tableau 3.1 – Schéma synthétique des techniques configurationnelles.

Le degré d'un nœud n'est à proprement parler pas une propriété configurationnelle car, comme dans l'analyse des tissus urbains, il se limite à décrire la connectivité d'un élément avec ses voisins directs. Les autres indicateurs configurationnels, en revanche, appréhendent les différentes propriétés spatiales qu'un élément possède du fait de son interaction potentielle avec tous les autres éléments du réseau (on mesure alors une propriété globale sur tout l'espace urbain) ou à l'intérieur d'un rayon donné (on mesure ici une propriété locale à une profondeur donnée).

L'indicateur le plus simple est celui d'atteignabilité (*Reach* en MCA/MaPPA, *node count* en Axial SSx), qui quantifie le nombre d'éléments qui peuvent être atteints à partir de chaque élément. L'éloignement (*farness*) des techniques primales correspond à la profondeur totale (*total depth*) des techniques duales et mesure quelle est la distance totale d'un élément à l'ensemble des autres. En le normalisant par l'atteignabilité, on obtient l'éloignement / profondeur moyen(ne). L'index d'intégration, qui est l'indicateur clé de l'Axial SSx, est une normalisation ultérieure de la profondeur moyenne par rapport à la valeur d'un réseau théorique (Hillier 1996). La proximité (*closeness*) en revanche, est l'inverse de l'éloignement et peut, à son tour, être normalisée. Pour rendre compte de la tortuosité des parcours, les graphes primaires permettent également de calculer un indicateur de rectilinéarité (*straightness*), qui est une atteignabilité où chaque destination est pondérée par le ratio entre la distance euclidienne et la distance réseau entre deux points. Globalement les indicateurs d'atteignabilité, proximité, intégration et rectilinéarité utilisent des métriques différentes pour caractériser un aspect essentiel de la centralité dans un réseau : le fait d'être proche aux autres. Il s'agit donc de différentes mesures du potentiel de mouvement vers un élément du réseau (le *to-movement potential* de Hillier 1996, 2012).

Un second aspect fondamental qui lui est complémentaire est celui de l'intermédiarité : on est en position centrale si on est un point de passage obligé pour les autres éléments du réseau. Il s'agit ici de mesurer le potentiel de mouvement à travers un élément du réseau (*through-movement potential* selon Hillier). Les indicateurs de *betweenness* (en MCA/MaPPA) et de *choice* (en Axial SSx) sont ainsi une mesure de combien de plus courts chemins de tout point à tout point passent par un élément donné. Un dernier aspect est celui du contrôle, mesurant la capacité d'un élément du réseau à être le seul passage possible (et pas seulement le plus court) pour atteindre d'autres éléments.

D'autres approches analytiques, plus originaux, trouvent également leur fondement dans ces propriétés configurationnelles. L'étude des réseaux de voisinage entre bâtiments, proposée par Badarionti et al. (2009), est ainsi une analyse de la variation de l'intégration du bâti par l'atteignabilité

3. Forme et organisation spatiale de la ville complexe

réticulaire. En faisant varier graduellement le rayon de calcul de 10 à 2000 m, on peut montrer l'existence de discontinuités et de ruptures, associées au passage d'une forme tissulaire à une autre. Selon ces auteurs, ces discontinuités contribuent directement à la complexité de l'organisation spatiale de la ville. Pour moi, cette recherche constitue surtout un premier pont entre approches configurationnelles et tissulaires. Le même peut être dit des travaux de Gil et al. (2012) et de Ye et Van Nes (2014), couplant paramètres tissulaires et paramètres configurationnels de la syntaxe spatiale.

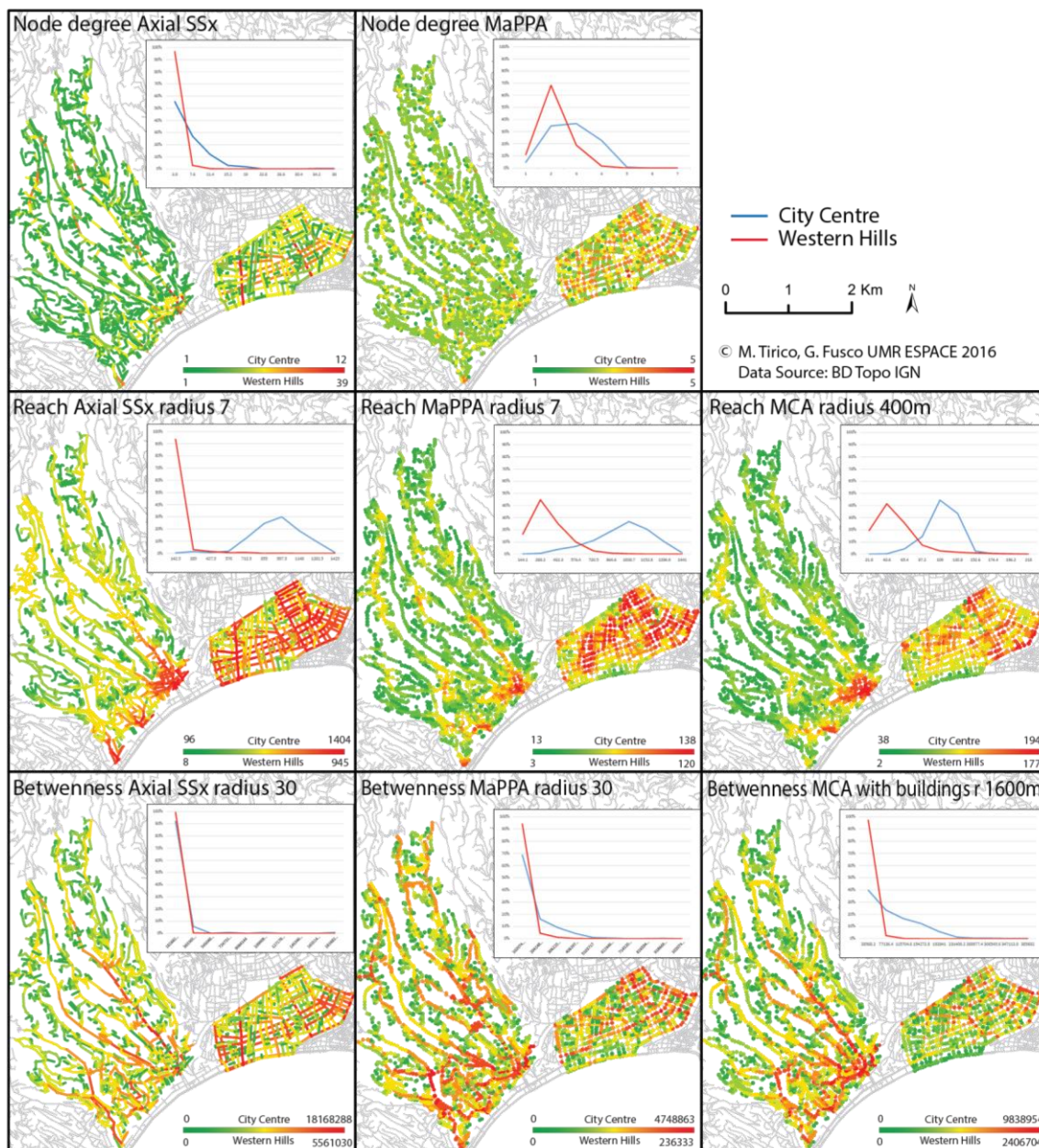


Figure 3.6 – Valeurs des propriétés configurationnelles dans deux aires emblématiques de la ville de Nice.

Suivant la suggestion de Badariotti et al. (2009), on peut montrer comment les formes urbaines observables produisent différentes distributions des indicateurs configurationnels au sein de leurs réseaux. Dans la Figure 3.6 sont montrées les valeurs des indicateurs configurationnels dans deux aires emblématiques de la ville de Nice : l'expansion à l'ouest de la vieille ville, planifiée au XIX^e siècle par le

Consiglio d'Ornato (Graff 2000) sur le principe d'un damier relativement régulier, et un secteur collinaire plus à l'ouest, où des axes de fond de vallée se connectent à des structures arborescentes desservant l'urbanisation collinaire. Les réseaux viaires arborescents présentent une hiérarchisation très prononcée des indicateurs d'intermédiarité : les quelques rues collectrices concentrent tous les flux, tandis que les branches de plus en plus extrêmes sont concernées par un nombre très faible de chemins minimaux. Les plans urbains en grille (damier ou grille déformée) et même les réseaux irréguliers et hautement connectifs des formes urbaines spontanées ont des distributions moins fortement hiérarchisées, à la fois pour l'intermédiarité et pour la proximité. Les résultats produits sur l'agglomération niçoise (Fusco et al. 2015, Fusco et Tirico 2016) confirment ces grandes tendances. Tout particulièrement, les valeurs des intermédiarités y semblent suivre une distribution en loi de puissance, signature de la complexité auto-organisée du réseau viaire (voir Section 3.4). Ces travaux confirment également l'indication de Porta et al. (2006a) : les résultats de l'analyse axiale de la syntaxe spatiale semblent dépendre davantage de la définition des éléments. Un long axe visuel a normalement des valeurs plus élevées d'intégration et de choix qu'un axe plus court. Il ne s'agit pas forcément d'un artefact (car il relève d'une réalité morphologique), mais cela donne une importance accrue à la phase de définition des éléments et produit une plus forte ressemblance entre les valeurs des différents indicateurs.

En conclusion, la complexité de la spatialité de la forme urbaine bénéficie d'une prise en compte complémentaire par le registre des tissus urbains et par celui de la configuration. Le premier aborde la complexité combinée des différentes composantes de la forme (bâti, parcellaire, rues, topographie) en leur reconnaissant une spatialité (géométrie des formes, topologie des connexions, dimension des éléments) dès l'échelle la plus fine et une genèse historique. La forme du tissu y émerge comme combinaison particulière de relations spatiales de voisinage entre les différentes composantes. Le second aborde la complexité agrégée du grand nombre d'éléments semblables en interaction dans l'espace : il permet d'appréhender les propriétés spatiales des éléments du réseau viaire qui découlent de l'interaction possible avec tous les autres éléments par le biais de la connectivité du réseau. En faisant émerger des axes et des parcours structurants, le registre de la configuration ouvre vers celui des tracés de l'organisme urbain.

Si le registre de la forme des tissus peut être renouvelé par l'approche computationnelle et par la prise en compte du point de vue du piéton, ces derniers ont caractérisé le registre de la configuration dès ses origines. Au sein du registre de la configuration, différentes techniques d'analyse fournissent à leur tour des regards complémentaires sur les propriétés des réseaux. Différemment modélisés, les réseaux viaires apparaissent comme la structure essentielle de la spatialité urbaine, à mettre en relation avec le potentiel de mouvement et les fonctionnements de la ville.

La configuration montre que la distance en soi n'est pas le principe fondateur de l'organisation urbaine

Plus que l'approche de la forme des tissus, celui de la configuration vise donc à étudier dès ses prémises la relation existante avec les fonctionnements humains de la ville. Je reviendrai dans la suite sur le lien forme-fonctionnement et sur le fait que tant l'approche de la forme des tissus que celle de la configuration des réseaux peuvent contribuer à éclairer la compréhension du lien forme-fonctionnement.

Je souhaiterais néanmoins développer ici un point qui est crucial dans la vision que la géographie urbaine peut avoir de la relation forme-fonctionnement et des implications en termes de complexité.

3. Forme et organisation spatiale de la ville complexe

Classiquement la géographie urbaine et celle des transports considèrent que les réseaux (viaires, routiers, ferrés), par la combinaison de leur forme et de leur performance, en connaissant la localisation des fonctions urbaines (les lieux de résidence, les emplois, les services, etc.) fournissent les distances entre tout couple de lieux au sein de la ville. Il s'agit clairement de définir la fonction de distance qui est la plus appropriée à l'étude des phénomènes en question (distance kilométrique, distance-temps, distance angulaire, etc.). En connaissant la distance entre deux lieux, les prémisses sont posées pour la détermination de leur interaction spatiale (les flux qu'ils s'échangent).

Or, ce que l'approche configurationnelle implique est que la géographie urbaine ne peut pas se satisfaire de la connaissance de la distance entre deux lieux et agréger ensuite les interactions identifiées entre les différents couples de lieux : ce qui compte est le système de toutes les distances, la configuration, au sein de laquelle les distances doivent être prises en compte de façon conjointe et relative.

Cela renvoie à un débat plus vaste autour du rôle de la distance pour expliquer, et ensuite modéliser, les flux humains dans l'espace géographique. Un emprunt très précoce aux sciences physiques a vu s'imposer l'approche du modèle gravitaire qui est présenté, de façon plus ou moins ambiguë, comme une façon pratique pour modéliser des flux ou, plus dangereusement, comme une loi régissant le mouvement des hommes et de leurs productions (marchandises, informations, etc.) dans l'espace. Une source et une destination de flux s'attireraient de façon directement proportionnelle à leurs masses (opportunément définies) et inversement proportionnelle à une fonction de leur distance (dans la formulation originale il s'agissait du carré de la distance, calquant parfaitement la loi de l'attraction gravitationnelle de Newton) :

$$F_{ij} \propto M_i M_j f(d_{if})$$

Au cours du XX^e siècle, cette modélisation gravitaire est devenue hégémonique en géographie urbaine (loi gravitaire pour les migrations interurbaines, Zipf 1946), en économie urbaine (loi gravitaire pour les fréquentations commerciales, Reilly 1931, et plus généralement sur l'organisation économique de la ville, Isard 1956), en modélisation de transports (Voorhees 1956), etc. et constitue toujours un élément incontournable dans tous cursus universitaire de géographie. Mais le présupposé réductionniste de cette approche s'adapte fort mal à la complexité des systèmes urbains. Il semble en effet bien douteux que la connaissance d'un système complexe puisse se réduire à l'addition d'interactions élémentaires qui découleraient seulement des masses des deux éléments et de la distance qui les sépare. D'un point de vue pratique, cette aporie était résolue par l'utilisation de deux séries de coefficients à calibrer sur chaque origine et destination d'un cas d'étude permettant de forcer le modèle à respecter la double contrainte du total des flux émis et absorbé par chaque lieu. Quel était le lien entre ces coefficients bien pratiques et la supposée loi d'attraction gravitationnelle entre masses géographiques ? Apparemment aucune.

Une réponse théorique à ce problème fut finalement fournie par Wilson (1970) en introduisant le principe de maximisation de l'entropie. Wilson montre ainsi qu'un modèle macroscopique gravitaire avec une fonction exponentielle négative de la distance donne la distribution la plus probable des flux parmi toutes les combinaisons des flux possibles d'individus dotés au niveau micro d'une énergie (permettant le mouvement) qui suit à son tour une fonction de distribution exponentielle négative suivant l'équation de Boltzmann. Pour ce modèle, les coefficients de calibration peuvent être rigoureusement calculés et justifiés dans la mesure où ils rendent compte du désordre résiduel au sein des contraintes de l'organisation spatiale de la ville (contraintes à l'origine, à la destination et dans les ressources disponibles pour les flux). Wilson dérive son raisonnement de la mécanique statistique : l'organisation spatiale des flux suit des contraintes externes, si les flux possibles au niveau

microscopique sont suffisamment nombreux, une approche agrégée peut bien modéliser les quantités échangées entre entités géographiques macroscopiques.

Une approche alternative avait en réalité été avancée par le sociologue américain S. Stouffer (1940) : la théorie de opportunités intervenantes (*intervening opportunities*). Au lieu de chercher des analogies avec la distribution de l'énergie et du mouvement parmi les particules d'un fluide, Stouffer part de l'observation phénoménologique des motivations et des raisons portant les individus à choisir une destination plutôt qu'une autre (son étude empirique portait sur les mobilités résidentielles des ménages dans l'espace urbain). Empiriquement, Stouffer trouve que la probabilité qu'un ménage i choisisse une destination j est inversement proportionnelle à une fonction puissance négative (calibrée par l'exposant α) du rang de la destination en question $r_i(j)$ dans un système de distances de destinations possibles :

$$p_i(j) \propto r_i(j)^{-\alpha}$$

L'agent humain cherche une destination qui lui est convenable et pour ce faire il explore (physiquement ou virtuellement) l'espace des solutions possibles à partir de sa localisation à l'origine : la probabilité de se satisfaire d'une destination donnée est d'autant plus importante que cette destination précède les autres en termes de distance à l'origine. Le flux macroscopique s'obtient en multipliant la population au départ de chaque origine par les probabilités des différentes destinations possibles. Contrairement au modèle gravitaire, la distance ne rentre pas directement en compte dans le calcul de l'interaction spatiale : si l'on dilate ou l'on rétrécit toutes les distances par un facteur donné, les flux échangés restent les mêmes. On peut néanmoins introduire une distance maximale au-delà de laquelle l'interaction spatiale devient techniquement impossible. Ce modèle possède plusieurs avantages indéniables : d'abord il se base sur l'observation empirique de comportements humains (et pas sur une analogie avec la dynamique des fluides), ensuite il n'a pas l'inconvénient de devoir calibrer des coefficients permettant d'implémenter la double contrainte des flux à l'origine et à la destination, ni celui de devoir partitionner l'espace urbain en zones distinctes (les modèles gravitaires avaient été conçus à l'échelle interurbaine mais ensuite appliquée dans l'espace d'une seule grande ville) avec le corollaire de devoir définir une distance conventionnelle intra-zonale.

À une première lecture il s'agit d'une théorie déconcertante pour le géographe de la ville : la distance ne semble jouer aucun rôle direct dans les fonctionnements urbains. En réalité il s'agit d'une véritable revanche de l'espace urbain, pour reprendre le titre de l'ouvrage de V. Cutini (2010) : la spatialité urbaine est beaucoup plus complexe que l'espace absolu cartésien sous-entendu par une mesure de distance, une position déjà défendue par D. Harvey (1969). C'est le système, complexe, des positions réciproques qui compte, c'est la configuration.

Deux positions s'affrontent alors frontalement. La première est basée sur l'espace absolu, le rôle direct de la distance entre deux lieux pour déterminer leur interaction spatiale, le modèle gravitaire et sa justification théorique par l'analogie avec les particules d'un fluide dans la mesure où la grande numérosité des agents humains le permet. La seconde est basée sur l'espace relatif, le rôle de la configuration d'un réseau pour produire un système de distances qui doit être appréhendé dans son entièreté, le modèle des opportunités intervenantes et sa cohérence avec les comportements humains observés au niveau de la prise de décision individuelle (l'individu, le ménage, l'entreprise). Ce second modèle me semble mieux s'accorder à l'approche des systèmes complexes organisés et au rôle pouvant être joué par l'organisation spatiale des réseaux dans la structuration des flux humains.

Un argument décisif en faveur de la seconde position semble venir d'une évidence empirique récente. Noulas et al. (2012) ont pu reconstruire, grâce aux données du réseau social Foursquare, les matrices origine/destination des mobilités urbaines tout motif confondu sur plus de 50 grandes villes

mondiales. Après avoir calibré les différents paramètres du modèle gravitaire à double contrainte et le seul paramètre du modèle des opportunités intervenantes, ce dernier se montre systématiquement et significativement plus proches des données empiriques. Qui plus est, une valeur sensiblement identique du paramètre de calibration est trouvée pour les cinquante villes étudiées, pointant vers des convergences étonnantes dans les fonctionnements métropolitains de ces grandes villes mondiales. **C'est le modèle de Stouffer qui l'emporte sur le modèle gravitaire, ce n'est pas par la distance mais par la configuration des positions que l'on peut appréhender les mobilités et les interactions spatiales dans la ville.**

Cela nous demande également de **revenir sur la première loi de la géographie** de Tobler (1970) selon laquelle, dans l'espace géographique, « tout interagit avec tout, mais deux objets proches ont plus de chances de le faire que deux objets éloignés ». Si l'espace d'étude est un espace où l'interaction entre les objets est sa raison d'être (la ville est un tel espace géographique), la loi de Tobler pourrait être réécrite ainsi : « dans l'espace géographique tout interagit avec tout, mais si un objet a deux voisins, il a plus de chance d'interagir avec le voisin plus proche qu'avec le voisin plus éloigné ». **La différence de formulation semble une nuance, en réalité elle est majeure : ce n'est pas la distance, dans l'absolu, qui compte, mais la position dans un système de distances, dans une configuration.**

3.5 Formes, configurations, fractalité : convergence de regards sur la complexité de la spatialité urbaine

La fractalité statistique de la loi de puissance, signature de la complexité auto-organisée de la ville

Les systèmes complexes auto-organisés que sont les villes ne sont pas modélisables, d'un point de vue fonctionnel, par un simple emboîtement de composantes (Alexander 1965, voir Section 2.1) : les modules fonctionnels correspondant aux lieux nécessaires à l'activité de chaque organisation humaine dans la ville (les ménages, les entreprises de différente taille, les services publics, les associations, etc.) s'intersectent et s'enchevêtrent de manière complexe, et ne donnent pas lieu à de simples emboîtements. Cela remet en discussion l'applicabilité des principes d'organisations proposés par Simon (1962) et basé sur une double décomposabilité horizontale et verticale des systèmes complexes (voir Section 2.3).

Alexander montre ainsi que toute tentative d'organiser le système morphologique urbain en modules emboîtés censés contenir le fonctionnement des modules fonctionnels sont vouées à l'échec. Ce paradigme avait dans le passé servi de guide tant au mouvement des cités jardins (création de quartiers, de villages et de petites villes autonomes, fédérés dans des systèmes urbains plus vastes) qu'aux propositions du mouvement moderne (création de pôles de services de proximité dans des quartiers résidentiels, qui sont à leur tour mis à système par des centres directionnels concentrant l'essentiel de l'emploi urbain). L'impression de forte organisation que ces villes planifiées au cours du XX^e siècle peuvent donner lorsqu'on les observe sur un plan va de pair avec les dysfonctionnements qu'elles engendrent du fait de la faible adéquation avec la complexité de leurs fonctionnements journaliers, hebdomadaires ou saisonniers.

Le système morphologique des villes traditionnelles, auto-organisées, semble plus chaotique car on y chercherait difficilement des composantes fonctionnellement autonomes et morphologiquement séparées. Au mieux (et on a vu avec quelles difficultés) on peut y définir des régions morphologiques, avec des fortes imbrications spatiales, sédimentées par le temps. **Cependant,**

ces villes ne manquent pas de principes d'organisation dans leur morphologie. De quels principes s'agit-il, alors ? **Il s'agit de principes d'organisation à première vue moins évidents, et souvent susceptibles de s'accommoder de davantage d'indétermination,** selon le principe morinien qui veut que la complexité auto-organisée est une augmentation corrélative de l'ordre et du désordre par le biais de l'organisation.

Des auteurs très différents tels que Barabasi (2002), Salingaros (2005) ou Newman (2006), identifient **la distribution en loi de puissance comme le plus important principe de l'auto-organisation des systèmes complexes.** A partir d'une taille minimale élémentaire, la fréquence des composantes d'un système complexe auto-organisé diminue avec l'augmentation de leur taille selon une loi de puissance inverse :

$$p(x) = C x^{-\alpha}$$

où C est une constante de normalisation ($\int p(x)dx = 1$) calculable seulement si $\alpha > 1$ (ce qui est toujours le cas dans les lois puissance identifiées, tant dans les phénomènes sociaux que dans les phénomènes naturels). Un système complexe auto-organisé présente ainsi un nombre très élevé de petites composantes, un nombre intermédiaire de composantes moyennes et un tout petit nombre de composantes de grande taille.

En géographie urbaine, la primauté dans la découverte d'une distribution en loi de puissance revient à Zipf (1949, voir Section 2.3). Dans un système urbain donné (national ou régional), la loi rang-taille est précisément une loi de puissance, révélant l'auto-organisation de la distribution des tailles des villes sur de grands espaces. En ce qui concerne l'organisation interne de l'espace urbain, la centralité des lois de puissance est surtout le fait de Salingaros (2005) et de Jiang (2013, 2015a, 2015b), qui reprennent des suggestions qui remontent à Alexander. Salingaros avance beaucoup d'exemples de distributions en loi de puissance pour les éléments morphologiques de la ville, de la longueur des rues à l'emprise au sol des bâtiments. Hillier (1996, 2012), ainsi que Porta et al. (2006b) identifient des distributions en loi de puissance pour certaines propriétés configurationnelles des réseaux viaires urbains. Dans le cadre de mes recherches sur l'organisation spatiale de la ville, la présence de la loi de puissance a été constatée à plusieurs reprises : le nombre de flux dominants entre les communes d'une aire métropolitaine (Section 2.3), la taille des ensembles d'unités spatiales contiguës appartenant à la même famille de tissus urbains (Section 3.3), les valeurs des propriétés configurationnelles, notamment des intermédiarités, entre les segments viaires d'une agglomération urbaine (Section 3.4), la distribution des surfaces commerciales entre les segments viaires d'une aire métropolitaine (Section 3.7). S'il est parfois difficile de distinguer la loi de puissance d'autres distributions à queue épaisse (voir ci-dessous), tous ces résultats pointent vers le caractère fondamentalement auto-organisé et complexe de la forme et de l'organisation spatiale de la ville, à différentes échelles et par rapport à différents aspects clés qui y concourent. Je rejoins sur ces points Salingaros (2005) et Jiang (2013).

D'autre part, Newman (2006) met en garde contre cet engouement pour la loi de puissance. On cherche et on voit des lois de puissance partout, guidés par ce lien entre loi de puissance et auto-organisation des systèmes complexes. Toutes les distributions à queue épaisse ne sont pas des distributions à loi puissance, ni dans les sciences naturelles, ni dans les sciences sociales. Ainsi les distributions de la taille des villes, de la fréquence des mots dans un livre, de la magnitude des tremblements de terre, des ventes de livres, de l'intensité des guerres, des patrimoines des ménages, etc. suivent des lois de puissance. En revanche, les distributions de l'abondance des espèces d'oiseaux dans les écosystèmes, du nombre d'adresses e-mails dans les carnets d'adresses des internautes, et de l'ampleur des feux de forêts, tout en montrant des queues épaisses, ne suivent pas de lois de puissance.

Dépourvus de taille typique, les phénomènes en loi de puissance posent des enjeux de connaissance incertaine

Les distributions statistiques à queue épaisse et, parmi elles, celles qui suivent une loi de puissance, se différencient des lois de distribution exponentielle (tels que les lois de Poisson ou de Gauss) du fait que le nombre d'éléments de très grande taille n'est pas négligeable et contribue de façon déterminante à la caractérisation de la population statistique. De ce simple fait, elles posent des enjeux de connaissance particuliers autour des phénomènes qui en sont caractérisés. En vue de leur rôle dans l'auto-organisation des systèmes complexes, cela pose encore une fois un lien fort entre complexité et connaissance incertaine.

Plus particulièrement, les phénomènes caractérisés par une distribution à queue épaisse ne possèdent pas de taille caractéristique. Cela les différencie et les oppose aux phénomènes caractérisés par des lois exponentielles, pour lesquels la valeur moyenne fournit une bonne statistique de valeur centrale. C'est l'opposition, opérée par Taleb (2007), entre l'Extremistan des phénomènes en lois de puissance et le Médiocristan des phénomènes gaussiens et poissonniens. La connaissance statistique que nous pouvons avoir des premiers n'est pas comparable à celle à laquelle nous sommes habitués pour les seconds. Mathématiquement, pour une distribution en loi de puissance, si $\alpha < 2$, il n'existe même pas de valeur attendue pour le phénomène en question (et si $\alpha < 3$ il n'existe pas de variance non plus) : on peut bien calculer une moyenne sur un échantillon de valeurs, mais cette statistique est instable et n'est donc pas informative sur la valeur centrale de la distribution. Une incertitude de fond plane alors sur la connaissance du système, surtout lorsque nous souhaitons maîtriser la connaissance de la distribution par la connaissance des moments statistiques qui sont la moyenne et la variance, en tant que mesures de la taille et de la dispersion que l'on peut attendre.

Pour revenir aux incertitudes caractérisant la connaissance des phénomènes distribués selon une loi de puissance, West et Salk (1987), ainsi que Salingaros (2005) soulignent que c'est l'attente de connaissance du chercheur qui doit s'adapter au contexte du système complexe. Il est ici essentiel de mobiliser le concept d'entropie tel qu'il est défini dans la théorie de l'information (Shannon 1948), à la fois comme mesure du désordre d'une distribution et comme mesure du contenu informationnel d'une distribution de probabilité acceptant du désordre.

La distribution en loi de puissance est en effet celle permettant de maximiser l'entropie sous la contrainte que toutes les échelles du système puissent contribuer d'une manière déterminée et connue à cette entropie. Il s'agit donc de la distribution la moins spécifique possible (compatible donc avec un niveau élevé de désordre) sous la contrainte de l'existence d'une relation inter-scalaire, liant les échelles de la distribution les unes aux autres et nécessitant leur prise en compte conjointe pour caractériser le contenu informationnel de la distribution. **La relation inter-scalaire organisant un système complexe est alors l'élément de connaissance le plus puissant dont nous pouvons disposer pour le caractériser :**

$$p(kx) = k^{-m} p(x)$$

Au-delà d'une taille minimale et à un facteur d'échelle près, la distribution en loi de puissance est la même à partir de chaque point de la distribution. Cette relation inter-scalaire peut donner lieu à une lecture relativement simple, comme la loi 80-20 de Pareto : si 20% d'une population statistique concentre 80% de la masse d'un phénomène, alors 20% de ce 20% continue à concentrer 80% du 80% et ainsi de suite.

Cette relation inter-scalaire est la même que celle identifiée par Mandelbrot (1983) dans ses formes fractales. La fractalité de la forme urbaine a en effet donné lieu à un important courant de recherche

sur la complexité de la ville, depuis les travaux de Batty (Batty et Longley 1994, Batty et Xie 1996), et Frankhauser (Frankhauser 1994, Thomas et al. 2007). Clairement, la fractalité des formes urbaines émerge aussi à une loi de puissance. Badariotti (2005) décline la théorie et les approches de Frankhauser à la caractérisation des tissus urbains de l'agglomération de Strasbourg. Ses indications sont précieuses sous plusieurs points de vue : d'abord car il descend pour la première fois au détail métrique des éléments de forme, ensuite car il donne une interprétation de la dimension fractale en termes d'homogénéité des tissus qui est parlante pour la morphologie urbaine. Globalement il opère un raccord entre le registre de la forme des tissus et l'approche de la complexité qui sous-tend les formes fractales.

Néanmoins, selon Salingeros (2005), l'invariance d'échelle des formes fractales n'est qu'un cas particulier de l'omniprésence de la loi de puissance dans les systèmes urbains. Il existe un vif débat sur le fait que les formes de la ville soient vraiment fractales, ou seulement approximables avec des fractales à l'intérieur d'une certaine gamme d'échelles. Surtout, la question porte ici sur la fractalité géométrique (régulière ou aléatoire), tandis que **le point central de l'auto-organisation des systèmes complexes est l'autosimilarité statistique des niveaux d'organisation.**

L'importance des relations inter-scalaires liant la taille à la fréquence des objets dans les systèmes complexes auto-organisés est pour Salingeros (2005, 2006, 2010) également un guide pour la conception urbaine et architecturale. Notre appareil perceptif a en effet co-évolué avec l'auto-organisation des systèmes naturels (formes du relief, formes végétales, animales, composition des écosystèmes, etc.) et reconnaît intuitivement leur naturalité dans les relations inter-scalaires qui les caractérisent. Tout objet architectural ou fragment urbain dont les composantes ne seraient pas distribuées selon une loi de puissance produiraient ainsi des pics d'information sur certaines tailles et des vides d'information sur d'autres et serait perçu comme ayant une forme artificielle, difficile à connecter émotionnellement pour l'utilisateur et l'observateur. L'indication pour le designer n'est ainsi pas celle de produire des objets ou des fragments urbains strictement fractals (autosimilarité géométrique, régulière ou aléatoire), mais de se conformer néanmoins à une distribution en loi de puissance dans la composition des objets (auto-similarité statistique). Il s'agit d'un objectif que l'on peut atteindre facilement en respectant une ancienne règle déjà en vogue parmi les architectes et les artisans du moyen âge : lorsque l'on conçoit un élément (structurel, décoratif, etc.) il faut à la fois le composer avec d'autres éléments de taille comparable pour obtenir un tout trois fois plus grand et le décomposer en sous-éléments de taille trois fois plus petite. Badariotti (2006) aussi identifie des règles de composition de base dans la production architecturale et urbanistique du moyen âge qui, par itérations successives, peuvent générer des propriétés trans-scalaires.

L'incertitude porte également sur les processus derrière les lois de puissance

Une seconde question de connaissance incertaine porte sur la détermination des fonctionnements des systèmes complexes auto-organisés à la base des distributions en loi de puissance. Il s'agit classiquement d'un problème d'équifinalité (Quine 1953, Von Bertalanffy 1968) ou de sous-détermination théorique (Varenne 2015) déjà discuté dans la Section 1.4 : **plusieurs théories sont compatibles avec le modèle de distribution statistique de la loi puissance.** Par la théorie de l'auto-organisation critique, Bak (1996) propose une première explication : un système complexe ouvert se maintient de façon permanente (avec quelques oscillations) autour d'une transition de phase (état critique). Peut-être aussi, les systèmes complexes auto-éco-organisés ne se maintiennent pas dans un état d'équilibre, mais dans une situation de déséquilibre permanent et s'alimentent précisément de ce déséquilibre entre leurs parties et entre ces dernières et l'environnement externe.

Pour Bejan (2002, Bejan et Lorente 2005, Rocha et al. 2013), les distributions en loi de puissance sont le produit d'une optimisation de l'utilisation de l'énergie. Un principe thermodynamique serait ainsi à l'œuvre pour construire graduellement par sélection naturelle des organisations spatiales « optimales » suivant une loi de puissance. Il semble néanmoins difficile de pouvoir reconduire tous les systèmes complexes auto-organisés, notamment sociotechniques, à une optimisation des échanges énergétiques.

Une autre explication possible, déjà avancée par des écologues dans les années 20 (Yule 1925) est la loi d'attachement préférentiel, repris dans les schémas théoriques de Barabasi et Albert (1999) de l'émergence d'un graphe sans échelle : les objets ayant une masse supérieure deviennent plus attractifs dans leur environnement et croissent davantage que les objets plus petits, ce qui permet de parvenir stablement à une distribution en loi de puissance sur la taille des objets. Pour Taleb (2007) aussi, la loi d'attachement préférentiel serait fondamentale dans les mécanismes socioéconomiques. Pour West et Salk (1987), plus précisément, la loi de puissance peut émerger d'un processus stochastique de fluctuations multiplicatives au sein d'un système social ou biologique, qui peut à son tour être interprété comme le comportement d'un système dynamique couplé à un environnement incertain (mais même seulement stochastique gaussien). En économie d'abord (Armatte 2005) et en géographie urbaine ensuite (Pumain et Saint-Julien 1997), la loi des effets proportionnels de Gibrat a été proposée comme modélisation de la loi d'attachement préférentiel. En réalité, la compatibilité entre la loi de Gibrat au niveau microscopique et la loi de puissance, de type Pareto-Zipf, au niveau macroscopique, continue à faire débat (Fujiwara et al. 2004, Bottazzi 2009).

Quoi qu'elle soit, notre méconnaissance sur les processus ayant produit les distributions en loi de puissance observables dans la ville, une observation de Salingaros (2005) me semble éclairante : **dans l'étude de processus mal connus, comme souvent dans les systèmes complexes, la morphologie observée peut offrir la seule base disponible pour essayer d'appréhender les mécanismes hautement complexes sous-jacents.**

Au-delà de la loi de puissance, l'émergence d'une forme urbaine selon Bill Hillier

Précisément sur la base de l'étude des morphologies observées, Hillier (2002, 2012) peut alors avancer une explication possible de la distribution en loi de puissance de la longueur des lignes visuelles. Il s'agit d'une explication qui trouve ses bases dans les principes de la perception des espaces urbains, de l'organisation et de la croissance incrémentale du système morphologique urbain, mais qui impose de dépasser la seule distribution statistique de la loi de puissance.

Empiriquement, selon Carvalho et Penn (2004), une ville est faite d'un tout petit nombre d'axes visuels extrêmement longs, de quelques axes relativement longs et d'une multitude d'axes petits et moyens. Mais cette loi de puissance n'est qu'une vision statistique et ne nous renseigne pas sur la disposition spatiale des éléments au sein du système morphologique. Or, relève Hillier (2002, 2012), un principe de continuité et de connexité des plus longues lignes semble s'observer dans une grande variété d'études empiriques (en Europe, dans les Amériques, en Asie), à la fois dans les villes plus organiques (Londres, Tokyo) et dans celles plus géométriques (Chicago, Athènes) : les lignes les plus longues se connectent très souvent entre elles et sont également en connexion directe avec un nombre important de lignes de dimension moyenne ; ces dernières, se connectent à des lignes plus courtes, qui sont à leur tour plus faiblement connectées. La longueur des lignes visuelles et leur connectivité est ainsi directement liée, même si de manière différenciée dans les villes (et les secteurs) de croissance organique, et celles où un effort de régularisation géométrique (plans en damier) a été imposé. Dans les deux cas, **les propriétés inter-scalaires des axes visuels résultent de l'organisation**

du réseau urbain en deux niveaux superposés : un **réseau d'avant-plan** de lignes plus longues et à plus forte connectivité (*foreground network*) et un **réseau d'arrière-plan** de lignes plus courtes, et moins connectées (*background network*). Les calculs d'Axial SSx sur la ville de Nice (Figure 3.7) confirment cette généralisation empirique et permettent même de montrer que le même principe régit l'espace du damier planifié du XIX^e siècle, et celui de l'expansion collinaire du XX^e siècle. L'analyse des voies de Paris et d'Avignon par Lagesse (2015) parvient à des résultats semblables.

Les propriétés configurationnelles d'intégration (*closeness*) et d'intermédiarité ne font que renforcer cette dualité de l'espace urbain et permettent d'identifier l'émergence de centralités diffuses sur le réseau, bien plus complexes de ce qui est admis dans les théories du polycentrisme. Hillier (2002, 2012) met par ailleurs en relation les espaces à plus haute centralité globale ou locale du réseau d'avant-plan avec les concentrations d'activité économique, et le réseau d'arrière-plan avec l'espace essentiellement résidentiel.



Figure 3.7 – La connectivité des lignes visuelles dans la ville de Nice.

Dans certaines villes, cette superposition de réseaux peut être l'objectif d'interventions planifiées sur la ville existante (comme à Rome sous Sixte V ou à Paris sous Hausmann). À Barcelone, en revanche, le plan d'expansion de Cerdà (1867) avait imposé un tel schéma même dans la conception d'un damier relativement homogène : celui-ci devait en effet être la matrice de fond sur laquelle greffer des petites connexions piétonnes (pour desservir l'intérieur des îlots) et sur laquelle superposer le réseau des grandes avenues, matérialisant dans l'espace urbains les parcours de connexions extrarégionaux de la ville. Mais ce qui est plus intéressant est que cette organisation se retrouve également dans les villes non planifiées.

Comment alors cette auto-organisation peut-elle émerger au cours de l'histoire urbaine ? Une première expérimentation avait montré la possibilité de simuler l'émergence de petites structures villageoises par l'assemblage par la règle de la mitoyenneté des murs périmétraux pour des dyades constituées d'un bâtiment et d'un espace vide sur lequel donne son entrée (Hillier et Hanson 1984, déjà cité dans la Section 3.1). Or, en poursuivant l'agrégation de ces dyades, on n'obtient pas une forme urbaine réaliste, mais plutôt une forme labyrinthique relativement éloignée des villes connues. Plus précisément, la topologie de cette forme simulée est encore compatible avec celle des formes

urbaines connues, mais pas sa géométrie : en termes de lignes visuelles, nous observons une distribution relativement gaussienne de leur longueur, bien éloignée de la distribution en loi puissance. Pour obtenir une forme réaliste, il faut introduire la règle de la moindre perturbation possible des axes visuels les plus longs déjà établis : à chaque pas du processus d'agrégation, le rajout par mitoyenneté d'une nouvelle dyade bâtiment-espace se fera préférentiellement en bloquant une ligne visuelle courte, si cela lui permet d'éviter de bloquer une ligne visuelle plus longue (Hillier 2012). **La logique est duale à celle de l'attachement préférentiel et on pourrait parler d'évitement préférentiel de la perturbation** : on évite de perturber une ligne visuelle longue, si l'on peut. Les lignes visuelles les plus longues, lorsqu'elles sont interconnectées, permettent de minimiser à la fois l'effort perceptif (vision de l'espace urbain depuis la rue) et cognitif (carte mentale de la structure des tracés de la ville), comme montré par Conroy Dalton (2003). En revanche, la connexion souvent indirecte des espaces interstitiels de la ville à ces grands axes permet de disposer d'espaces plus contrôlables en termes d'accès et de mouvement. Pour Hillier, cela implique qu'historiquement les agents humains ont dû implémenter des lois spatiales sans les connaître de façon explicite : une connaissance tacite (voir Section 1.2) a induit les acteurs urbains à prendre localement (c'est-à-dire sans avoir un plan d'ensemble de la forme urbaine) les décisions de poursuite ou de fermeture d'un axe visuel en tenant compte de cette duplicité des réseaux. Cela concorde avec l'approche de la conscience spontanée de Caniggia et Maffei (1979) : comme dans la production des types architecturaux et des tissus urbains, dans celle des configurations réticulaires, **la myriade des petites et des grandes décisions de la fabrication de la ville est coordonnée par une conscience spontanée donnée par une culture urbaine qui, au moins traditionnellement, a toujours intégré les principes de la perception et du mouvement du piéton dans la ville.**

Au-delà des cas de superposition successive d'avenues et de boulevards d'interconnexion, les principes esquissés par Hillier sont également compatibles avec le processus morphologique de l'expansion urbaine non planifiée des villes européennes au moyen-âge étudié par Caniggia et Maffei (1979). Un parcours fondateur (*percorso matrice*) reliant souvent la ville avec d'autres objets géographiques (une autre ville, des exploitations agricoles, le passage d'un fleuve, etc.) sert d'appui à la transformation de parcellaire agraire en parcellaire urbain sur ses abords, selon les besoins en surface du type porteur de l'époque, et orientant la disposition des nouvelles constructions (naissance du faubourg). Des nouveaux tronçons viaires d'implantation (*percorsi di impianto*) sont alors créés transversalement à ce parcours fondateur, avec une inter-distance correspondant au double de la profondeur typique des parcelles résidentielles. Finalement, des besoins de connexions donnent naissance à des nouveaux tronçons viaires de connexion, transversaux aux parcours d'implantation, plus ou moins alignés et plus ou moins parallèles au parcours fondateur. A la différence des autres types de tronçons viaires, les parcours de connexion n'orientent pas des nouvelles parcelles avec une nouvelle urbanisation, même si au cours du temps des processus réplétifs portent une urbanisation non typique à combler les jardins des parcelles ayant accès direct aux tronçons viaires. Surtout, en ce qui nous concerne, les parcours d'implantation sont relativement droits mais moyennement courts et les parcours de connexion se composent de nombreux segments mal alignés (se décomposant ainsi dans des petites lignes visuelles au sens de la syntaxe spatiale). On pourrait même rajouter que, dans la suite de l'histoire urbaine, les opérations d'élargissement et de rectification concernent en premier chef les parcours matrices, du fait de leur double rôle d'axe structurant de la croissance urbaine et de connexion interurbaine.

Nikos Salingaros renouvelle l'analyse de la forme urbaine par l'approche de la complexité

L'analyse attentive des morphologies observables est également le point de départ du mathématicien, architecte et urbaniste Nikos Salingaros, qui nous propose des clés de lecture particulièrement riches pour la complexité de la ville. Les pages suivantes proposent un commentaire critique de son ouvrage majeur sur l'analyse des formes urbaines, « *Principles of Urban Structure* » (Salingaros 2005), ses ouvrages successifs (Salingaros 2006, 2010) portant davantage sur l'analyse et la conception architecturale.

Pour Salingaros, la complexité du système morphologique urbain permet différents schémas de décompositions en éléments constitutifs.

- La première décomposition de la ville considère les bâtiments comme ses unités élémentaires, qui interagissent par le biais de parcours qui le relie. Il s'agit de la décomposition la plus classique, particulièrement préférée par les architectes et les ingénieurs du bâtiment.
- Une seconde décomposition considère la ville comme un système de parcours, ancrés et guidés par des bâtiments. Cette décomposition a notamment régi mes analyses des tissus urbains par l'approche MFA et est la base de la théorie de la toile urbaine de la part de Salingaros. La plupart des approches configurationnelles sont également sous-tendues par cette vision de la ville.
- Une troisième décomposition considère la ville comme un système d'espaces internes et externes, connectés par des parcours et renforcés par des bâtiments. Présente dans les analyses configurationnelles des espaces convexes de Hillier et Hanson (1984), cette conceptualisation de l'espace urbain permet à Salingaros de formuler la théorie du champ d'information urbain.
- Une quatrième conceptualisation est celle de la ville comme système de bords et d'interfaces permettant de délimiter et de mettre en contact des espaces ouverts et des bâtiments. Cette vision a été notamment défendue par Alexander et al. (1977) comme base pour l'identification de patrons de composition (*pattern language*). Mes réflexions conduites dans le cadre du groupe Interfaces de l'UMR ESPACE (Groupe Interfaces 2008) m'ont permis de mieux apprécier l'approche d'Alexander.
- Une cinquième conceptualisation, liées à la précédente et proposée toujours par Alexander et al. (1977), voit la ville comme un système d'activités et d'interactions humaines localisées sur des bords et des interfaces urbaines. Partir des activités humaines permet à Alexander de mieux cerner les solutions morphologiques dans une démarche de conception architecturale.

D'autres décompositions pourraient encore être proposées. J'ai par exemple déjà eu occasion de montrer comment les analyses de la forme bioclimatique de la ville et celles portant sur les processus morphologiques transformatifs ont souvent privilégié une décomposition de l'espace urbain en îlots entourés par des parcours et partiellement occupés par des bâtiments. Pour Salingaros, chaque décomposition est finalisée à étudier des aspects différents de l'organisation spatiale et de la forme urbaine. Chacune permet d'avoir une compréhension partielle de la complexité des formes et des fonctionnements de la ville.

La **théorie de la toile urbaine** (*urban web*) de Salingaros est une approche à la complexité structurelle de la ville qui part de sa spatialité réticulaire. La toile urbaine est un modèle d'appréhension de la ville respectueux de sa complexité auto-organisée. La toile urbaine est l'ensemble des connexions qui permettent de relier les nœuds d'activité de la ville. Un nœud n'est pas seulement un bâtiment, mais tout objet urbain susceptible d'usage (donc également un arrêt de bus, un étal de marché, un banc dans un jardin public, etc.). Les connexions sont celles susceptibles de s'établir par le fonctionnement autonome des acteurs localisés dans les nœuds dans différents

moments de la journée : flux de personnes, d'énergie, de marchandises, d'informations. Pour s'établir ces connexions ont besoin de canaux physiques (rues, trottoirs, lignes ferrées, infrastructures de télécommunication, etc.). Les connexions qui permettent de créer de l'activité urbaine à l'échelle la plus fine, sont celles du mouvement piéton, forcément limité dans des rayons de quelques centaines de mètres. Les autres surgissent au fur et à mesure que l'organisme urbain se développe et grandit, mais elles ne doivent jamais mettre en danger le fond de la toile, faite d'un continuum de connexions piétonnes. En développant sur les travaux de l'architecte et urbaniste danois Jan Gehl (1987), Salingaros remet ainsi le mouvement piéton au centre du fonctionnement urbain. Par ailleurs, les limites de charge des différents canaux peuvent entraver le développement des connexions. Lorsque l'on observe l'organisation autonome de connexions piétonnes dans un espace urbain on est ainsi toujours confronté à l'émergence de parcours multiples et redondants, avec une grande connectivité entre eux. **Mais les connexions ne coïncident pas avec les infrastructures physiques, elles sont d'abord le résultat de l'auto-organisation urbaine, sous contrainte des réseaux de canaux.** Créer une nouvelle autoroute urbaine, une nouvelle ligne de tramway ou un nouveau trottoir ne revient donc pas à créer *ipso facto* des nouvelles connexions. Ces nouvelles infrastructures s'insèrent néanmoins dans la toile urbaine existante et sont susceptibles d'amplifier/freiner certaines tendances à l'auto-organisation.

Salingaros articule les approches réticulaires (la multiplicité et la redondance des parcours, la connectivité du réseau des parcours) avec la question de la mixité fonctionnelle : les connexions physiques deviennent des parcours empruntés par les piétons seulement dans la mesure où ils connectent des nœuds d'activité urbaine différente (résidence, services, commerces, emplois, etc.). Un quartier uniquement résidentiel sera ainsi relativement pauvre en connexions piétonnes, en dépit de l'effort des urbanistes d'y démultiplier les sentiers et les trottoirs.

La grande perspective ouverte par la théorie de la toile urbaine de Salingaros est celle d'une **analyse morpho-fonctionnelle** des espaces urbains, couplage des registres des formes des tissus et des tracés avec ceux des configurations et des morphologies sociales et fonctionnelles. Un des défis pour la géographie de modélisation sera celui d'opérationnaliser ces analyses, comme déjà entamé par le modèle Remus (Badariotti et al. 2007, 2009), en intégrant des nouvelles hypothèses théoriques et les suggestions d'autres approches computationnelles (MCA, MFA, Space Syntax). Des nouvelles questions pourraient ainsi être abordées par l'analyste et par le concepteur des espaces urbains : où sont les usagers de la ville ? Comment peuvent-ils se connecter en utilisant des nœuds d'activité qui leurs sont communs ? Est-ce que l'infrastructure morphologique est capable de soutenir ces *patterns* d'interaction entre usagers ? Il s'agit de suggestions déjà présentes dans l'ouvrage pionnier de J. Jacobs (1961) mais qui trouvent dans l'approche de Salingaros une prise en compte plus précise du caractère réticulaire de l'espace urbain et des limites propres au mouvement piéton.

La théorie de la toile urbaine intègre des aspects essentiels de la ville en tant que système spatial complexe : nécessité de catalyser les interactions entre fonctions résidentielles, productives, tertiaires et de loisirs avec des rythmes de temporalité quotidienne, nécessité d'imbriquer l'espace public et l'espace privé, nécessité de prévoir des redondances dans les réseaux de canaux physiques pour soutenir une grande diversité de connexions possibles, et, surtout, elle met en son centre les besoins du piéton qui se déplace dans l'espace urbain (dans le cadre d'un déplacement entièrement piéton ou bien en complément de trajets effectués par d'autres modes de transport). Les besoins perceptifs et cognitifs du piéton sont ultérieurement développés dans la théorie du champ d'information urbain.

Théorie de champs d'information urbain. En se déplaçant dans l'espace urbain et en observant les objets urbains depuis ce dernier, le piéton reçoit un ensemble d'informations sensorielles (surtout

visuelles et sonores, mais également tactiles). Les êtres humains, après tout, sont des « machines » aptes à traiter de l'information et leur existence dépend cruciallement de leur habilité à interpréter l'information de leur environnement. Dans la mesure où l'information fournie aux piétons est riche et présente à tous les niveaux de l'organisation hiérarchique de la complexité urbaine, le champ urbain optimise l'entropie des messages renvoyés aux piétons et maximise ainsi son contenu informationnel : trop peu d'entropie, et l'espace urbain est perçu comme pauvre et artificiel, trop d'entropie et la perception est celle d'un espace chaotique, sans organisation apparente. La théorie du champ d'information urbain se raccorde ainsi au principe de la distribution en loi de puissance des structures auto-organisées : c'est cette distribution de la taille des éléments perçus par le piéton qui optimise le contenu informationnel qu'il peut recevoir. Cela implique que la forme urbaine compte jusqu'au niveau du détail : l'organisation spatiale des quartiers et des tissus, l'organisation de l'espace visuel par les bâtiments, la composition de chaque bâtiment, l'ornement des bâtiments et du mobilier urbain, la texture des matériaux, etc. Tous ce qui est à hauteur de vue du piéton et dans son champ de vision rapproché est particulièrement important pour la formation du champ d'information. En suivant J. Jacobs (1961), la présence d'autres piétons augmente à son tour le champ d'information urbain, ce qui entraîne l'émergence d'une boucle d'interaction positive : les piétons ont une expérience positive des espaces riches d'information et la fréquentation s'en trouve accrue, catalysant également l'apparition d'activités qui vont avec la présence du public (notamment les commerces, les activités artistiques et l'animation de rue). La présence de piétons et de commerces, à son tour, attire d'autres piétons et augmente le champ d'information de l'espace public en question.

Salingaros rejoint ici Alexander (2002-2005) : au sein du système d'espaces publics d'une ville, on peut identifier ce qui est « l'espace urbain positif » (*positive space*). Ce dernier est l'espace public dont le champ d'information pour le piéton est particulièrement riche. C'est la production de cet espace qu'il faut maximiser dans la ville et bien distribuer spatialement dans tous ses quartiers.

La théorie du champ d'information urbain se pose clairement dans le registre de la forme du paysage urbain visuellement saisi dans sa tridimensionnalité et dans sa matérialité plastique. Elle se raccorde néanmoins avec les principes de l'auto-organisation de la complexité urbaine. De surcroît, Salingaros la raccorde également avec l'analyse morpho-fonctionnelle de la théorie de la toile urbaine. D'une part, l'espace urbain perceptible par le piéton, pour être explorable de manière continue, nécessite de la connexité de la toile urbaine : la création d'espaces urbains hautement informatifs uniquement dans des centres commerciaux entourés de vastes parkings visuellement pauvres et hostiles aux piétons est un aveu d'échec de la part de l'urbanisme moderne. De l'autre, la toile urbaine se renforce par la présence d'espace urbain positif, hautement informatif : ce dernier permet la création de nombreux nœuds éphémères de piétons qui s'arrêtent pour saisir l'information transmise par le champ visuel, ces nouveaux nœuds qui se créent et se détruisent au cours de la journée finissent par dépasser en importance les nœuds plus stables des objets physiques, renforçant mutuellement la toile urbaine (des parcours piétons relient les nœuds éphémères) et le champ d'information urbain (le champ s'enrichit de la présence de piétons à l'arrêt).

Les approches configurationnelles, rapidement cités par Salingaros en introduction à ses théories, ne trouvent pas leur place dans les protocoles d'analyse proposés. On retiendra ainsi au moins une divergence de fond entre les deux approches. Pour Hillier (et Hanson 1984, et al. 1993), l'approche configurationnelle pose un ensemble de contraintes spatiales minimales sur des processus autrement aléatoires. On étudie l'impact de la configuration spatiale des réseaux viaires physiques dans la structuration de flux aléatoires de tout point à tout point au sein de l'espace urbain (théorie du mouvement naturel) et l'on peut montrer que la localisation des fonctions dépendra, au moins en

partie, du potentiel d'interaction donné par la configuration. Pour Salingeros, en revanche, le mouvement ne peut pas se concevoir de tout point à tout point car les fonctions comptent. Si des fonctions complémentaires sont proches, elles forment des modules connectés par des parcours piétons ; si des modules complémentaires sont à leur tour proches, ils forment un ruban continu, structure spatiale essentielle à l'ensemble du système urbain. La répétition d'éléments identiques, même rapprochés dans l'espace, ne forme pas un module. De surcroît, le réseau qui doit être analysé en termes de connexité et de configuration n'est pas celui des rues ou celui des trottoirs, mais celui des connexions piétonnes qui s'établissent (le long des rues et des trottoirs) par l'interaction de proximité entre fonctions urbaines complémentaires.

Dans la suite de son ouvrage Salingeros se fait plus normatif. Il souhaite donner un ensemble de règles pour aider l'urbaniste à concevoir des espaces urbains positifs et fonctionnellement connectés. Son argumentaire se fait plus persuasif qu'analytique, son but étant de guider le processus créatif du concepteur. L'idée centrale que Salingeros défend est celle de la **création d'espaces urbains « cohérents »**. Cette cohérence est néanmoins définie de façon relativement vague et allusive à différentes approches d'analyse de la ville : celle de de K. Lynch (1960) sur la lisibilité des espaces urbains (lisibilité des rapports spatiaux entre les éléments visuellement perçus par ses usagers), mais également celle des approches de l'auto-organisation des systèmes complexes, tout comme l'idée d'équilibres de long terme dans la composition spatiale de la ville à différentes échelles. La cohérence qui est plus clairement recherchée et définie est celle de type géométrique aux échelles les plus fines, faisant la part belle aux couplages entre objets physiques par le biais des complémentarités de forme et/ou par la présence d'interfaces perméables. Le rôle central joué par les interfaces (arcades, vérandas ouvertes, bollards, avancées des façades, terrasses, diaphragmes variés, etc.) reprend la théorie des limites « douces » (*soft edges*) de l'architecte danois J. Gehl (1987) ainsi que de l'approche des interfaces d'Alexander et al. (1977) et une certaine allusion à la fractalité des interfaces. Salingeros critique de manière assez virulente la pratique architecturale et urbanistique courante revenant à donner pleine liberté à concevoir des formes, des fonctions et des dispositions quelconques pour un bâtiment au sein d'une parcelle donnée, en se reposant sur le fait qu'un réseau viaire en damier assurera la cohérence de la forme urbaine aux échelles supérieures. En réalité, la géométrie du damier masque l'absence totale de relations géométriques et fonctionnelles entre les différents bâtiments. Une preuve pour la cohérence du tissu urbain dans son ensemble est sa capacité de résister à des déformations, sa plasticité : si en déformant la grille du damier, toute cohérence est perdue, il ne s'agissait que d'une cohérence apparente. Seulement les règles de couplage fonctionnel (activités en rez-de-chaussée et logements à l'étage), géométrique entre bâtiments (mitoyenneté, alignement des lignes de gouttière, complémentarités des ornements des façades, rythmes et gradients dans l'alternance des compositions, etc.) et entre bâtiments et rues (alignements des bâtiments sur les rues, présence d'arcades et de vérandas interfaçant rues et bâtiments, etc.) peuvent assurer une réelle cohérence au tissu urbain et une plasticité permettant de ne pas perdre cette cohérence en présence d'évènements perturbant la géométrie du damier.

L'argumentaire de la cohérence prônée par Salingeros devient moins convaincant lorsque l'on passe aux échelles plus larges de l'organisation d'un quartier ou d'une ville dans son ensemble. Salingeros parvient à démontrer les incohérences produites par une approche « *plug-and-play* » à l'aménagement urbain. Dans une analogie avec les architectures informatiques, la complexité des composantes *hardware* est à analyser en relation avec la complexité des composantes logicielles. La possibilité d'assemblages *plug-and-play* entre composantes matérielles différentes, déjà mise au point par l'industrie militaire américaine pendant la seconde guerre mondiale, repose sur la standardisation des interfaces de communication entre ces modules et nécessite une plus grande complexité des

architectures logicielles devant répondre à ces contraintes d'interconnexion. Le progrès prodigieux de la puissance de calcul des ordinateurs permet cet alourdissement des architectures logicielles.

Or, transposée à la conception urbaine, cette approche produit des dysfonctionnements rédhibitoires. La pratique urbanistique courante est caractérisable de *plug-and-play* dans la mesure où l'on conçoit des modules à l'organisation interne particulièrement simplifiée (quartier des affaires, quartier résidentiel, espace commercial, chacun constitué de la simple répétition des mêmes fonctions et des mêmes typologies architecturales), laissant aux fonctionnalités des systèmes de connexions externes (les réseaux viaires et routiers) la lourde tâche d'assurer au moins la cohérence de l'ensemble de l'organisme urbain (celle de plus petite échelle étant retenue superflue). On remplace la complexité morphologique par la complexité des réseaux de transport, et on réduit cette dernière aussi, à un sous-ensemble d'échelles retenues pertinentes. On obtient en réalité des espaces visuellement et fonctionnellement incohérents sur la presque totalité des échelles analysées, une toile urbaine fragmentée et presque inexistante et une rareté extrême d'espaces à haut contenu informationnel pour les piétons.

On cherchera en revanche en vain une proposition plus claire sur l'organisation spatiale de la ville à une échelle qui dépasse celle du tissu urbain. D'un côté, Salingaros semble indiquer que cette dernière devrait presque émerger de façon autonome et que l'essentiel est d'assurer la cohérence aux échelles plus fines. De l'autre il suggère que des interventions externes se rendent nécessaires sur un tissu auto-organisé pour assurer des connexions de plus large portée (création de boulevards urbains d'interconnexion, de lignes de tramway ou de métro, etc.) comme Hausmann l'avait fait à Paris dans la seconde moitié du XIX^e. Un tissu plus ou moins régulier de connexions de proximité envolerait alors vers une structure réticulaire de type petit-monde (Watts et Strogatz 1998), assurant des parcours de tout point à tout point dans un nombre limité de connexions. La vision sur la décomposabilité de l'espace urbain dans des plus grands modules morpho-fonctionnels semble également hésiter entre la vision de la quasi-décomposabilité prônée par Simon (à condition, bien évidemment de coupler le bon mix fonctionnel et une morphologie physique cohérente dès l'échelle la plus fine) est celle de l'enchevêtrement inévitable des premiers travaux d'Alexander, évoqué au début de cette section.

Finalement, avec un renvoi également aux *patterns* d'Alexander et al. (1977, voir Section 5.2), Salingaros souligne la supériorité de l'organisation morpho-fonctionnelle de la ville traditionnelle, avec ses tissus urbains denses, mixtes, finement connectés, aux espaces publics riches de contenu informationnel car bordés par des bâtiments mitoyens et visuellement imbriqués. Les tissus déconnectés produits dans l'après-guerre lui semblent nettement moins cohérents et pauvres en termes de complexité, en dépit (ou probablement précisément à cause de) l'effort de composition de la part de ses concepteurs. Cela concerne à la fois les tissus d'habitat pavillonnaire aux réseaux viaires organiques (mais faiblement connectés), et les tissus de grands bâtiments spécialisés (tertiaires, commerciaux, résidentiels) et isolés, conçus de façon indépendante sur des vastes parcelles faisant la part belle au stationnement automobile. Quelle seraient alors les raisons du succès de ces formes urbaines dans la croissance urbaine et métropolitaine contemporaine ? Salingaros ne va pas plus loin d'une mise en cause d'anti-patterns agissant comme des virus, des *memes* au sens de Dawkins (1989), qui se seraient introduit dans notre culture urbanistique et architecturale depuis l'affirmation du mouvement moderne (thèse reprise également dans Salingaros 2006). Aucune tentative n'est faite de corrélérer les formes de l'urbanisme moderne et postmoderne à des nouveaux fonctionnements urbains et métropolitains, à une nouvelle organisation économique de la promotion immobilière, à des nouvelles pratiques de l'espace et à des nouvelles représentations sociales (forcement symboliques) de ces mêmes espaces. **Les clés de lecture sur la complexité morphologique de la ville proposées par**

Salingaros restent pour moi précieuses, mais elles **doivent être complétées par une vision plus générale de l'organisation urbaine et métropolitaine dans le contexte des transformations socioéconomiques et culturelles qui nous sont contemporaines**. La prochaine section propose un certain nombre de réflexions susceptibles de contribuer à cette mise en contexte.

3.6 Les multiples relations entre formes et fonctionnements pour la ville

Organisation socioéconomique et organisation spatiale de la ville

La morphologie sociale de l'espace urbain est précisément l'étude de la spatialité de l'organisation socio-fonctionnelle de la ville. L'hypothèse de l'analyse morpho-fonctionnelle à la Salingaros est qu'elle puisse être liée, au moins partiellement, à l'organisation de la forme physique de la ville (tissus, tracés, forme tridimensionnelle perceptible). Cette connexion est également au cœur de nombreuses intuitions et principes de la syntaxe spatiale (la loi du mouvement naturel, les potentiels de mouvement vers et mouvement à travers, les logiques du contrôle du mouvement, la dichotomie entre réseaux d'avant-plan et d'arrière-plan) : il s'agit d'éléments qui ont nourri une importante direction de recherche sur la relation entre la forme (ici la configuration des réseaux) et les fonctions urbaines.

Quelle relation s'établit alors entre les formes physiques de la ville et l'organisation socioéconomique des sociétés urbaines ? Dans ce qui suit, je m'attèlerai à montrer que **réduire la morphologie sociale urbaine à la « projection » spatiale des rapports sociaux est à la fois une négation de la complexité urbaine et, peut-être de façon encore plus profonde, une véritable aporie scientifique**. J'épouse en cela des thèses déjà défendues par Hillier et Hanson (1984, rapidement mentionné en Section 3.1) et, plus spécifiquement, par Roncayolo (1996).

Quels seraient déjà les rapports sociaux qui devraient se projeter dans l'espace urbain ? Même dans l'analyse des sociétés, les pères fondateurs de la sociologie (Marx, Durkheim, Max Weber) identifient une pluralité de principes d'organisation. La principale distinction est celle entre la division sociale du travail et la division technique du travail. Une seconde opposition est celle entre l'organisation de la production et celle de la reproduction sociale.

La division sociale du travail est liée aux rapports sociaux qui régissent la production et l'échange économique. A l'origine c'est la répartition des rôles dans l'approvisionnement de la nourriture et la production des objets des cultures nomades, ensuite c'est la division ville-campagne et, en même temps, l'opposition entre travail manuel et travail intellectuel au sein d'économies urbaines qui vont se complexifiant. Au fur et à mesure que les rapports marchands s'étendent, la division sociale du travail devient également l'opposition entre la force de travail, qui ne possède plus ses moyens de production, et le capital. De l'échange marchand de la force de travail naît la plus-value (Marx 1867, mais avant lui déjà Ricardo 1817), les rapports de production et de propriété de l'organisation capitaliste de la société, leurs inégalités et leurs hiérarchies (Harvey 1985).

La division technique du travail est liée aux contraintes techniques de la production et elle aussi suit la complexification progressive des sociétés humaines (Durkheim 1893, Béjin 1974). La grande manufacture concentrée produit une spécialisation des tâches, qui nécessite d'articuler les échanges entre les différentes phases de la fabrication, sans passer nécessairement par les mécanismes de marché. Les lieux même de la production se complexifient : l'atelier de l'artisan est d'abord remplacé par la manufacture concentrée, ensuite par l'usine moderne du paradigme fordiste, et actuellement par l'éclatement optimisé des chaînes de production qui s'étendent parfois à l'échelle du globe. Même

cette division technique du travail est porteuse d'une organisation sociale et spatiale, avec ses mécanismes de coordination et ses hiérarchies. Division sociale du travail et division technique du travail organisent la sphère de la production et de la distribution des biens et des services d'une société (Marx 1867). La reproduction sociale nécessite un certain nombre de ces biens et services, marchands et non marchands, mais surtout elle concerne d'autres sphères du vivre en société qui ne sont pas directement liées à la production et à l'échange. Il s'agit de la sphère privée de la vie familiale, ou de celles plus collectives de l'école, de la religion et de la vie associative et culturelle, plus en général il s'agit de la sphère de l'habiter et du consommer, dans le sens le plus large que ces deux termes peuvent prendre. C'est dans ce contexte que les forces du travail se reproduisent, matériellement et intellectuellement, pour rentrer ensuite dans les cycles de la production sociale.

Or comment ces principes de l'organisation sociale s'articulent avec l'organisation socio-spatiale de la ville ? La tentation pourrait être forte de faire correspondre à la hiérarchie des rôles dans la division sociale du travail, se traduisant en hiérarchie de revenus et de patrimoines, la hiérarchie des lieux de la ville. Une tentation d'autant plus forte à une époque où les valeurs marchandes régissent l'essentiel de l'allocation des sols urbains, des logements, des investissements en infrastructures, etc.

Dans l'histoire de la sociologie et de la géographie urbaine, l'écologie urbaine américaine, et notamment l'école de Chicago, a produit une première tentative, paradigmatique, d'articuler la division sociale du travail, le pouvoir d'achat des ménages, la mobilité résidentielle et la division sociale de l'espace urbain. Mais pour Roncayolo (1996), en dépit des mérites de ces pionniers de la morphologie sociale urbaine, leur démarche est restée essentiellement empirique. Parker, Burgess, Hoyt n'ont pas su fournir un cadre explicatif suffisamment général pour pouvoir s'éloigner du cas très spécifique des grandes villes industrielles en forte croissance démographique et économique du Midwest américain au début du XX^e siècle et, finalement, du cas très spécifique de Chicago. Fondé sur l'observation d'un autre cas paradigmatique, celui de San Francisco, le modèle de la mosaïque polynucléaire d'Harris et Ullman (1945) serait encore une tentative empirique de faire correspondre des statuts économiques et des fonctions productives à des sous-espaces urbains bien définis.

Roncayolo (1996) relève qu'une question théorique de fond n'a pas été abordée : la division sociale et fonctionnelle de l'espace urbain est-elle une des manifestations de la division sociale du travail ou bien une hiérarchisation qui s'articule avec d'autres formes de hiérarchie ?

Weber (1922) identifie trois hiérarchies qui peuvent structurer les rapports sociaux : le statut économique (et donc le rôle dans la division sociale du travail), le pouvoir (lié aux rapports politiques dans la cité) et le prestige (lié aux valeurs culturelles partagées). Halbwachs (1938) et Merton (1968) soulignent l'importance des représentations sociales. Merton différencie ainsi le groupe d'appartenance (que l'on pourrait éventuellement rapporter au rôle objectif dans la division sociale du travail et donc au statut économique) et le groupe de référence, que l'on peut seulement saisir en référence au prestige exercé par d'autres groupes sociaux. Tant pour Halbwachs que pour Merton l'attention doit être mise sur les systèmes de valeurs au sein d'une société. Ceux-ci, à parité de revenus, peuvent différemment caractériser les groupes sociaux. Halbwachs souligne ainsi qu'il existe des ordres de priorité différents dans les attitudes à la consommation parmi les différents groupes sociaux. Une fois que la consommation est appréhendée en tant que pratique sociale, susceptible de marquer des distinctions et des appartenances, Bourdieu (1979) nous montre que les attitudes des groupes sociaux peuvent être différentes en matière de choix résidentiels, de styles de vie, etc. et ne se réduisent pas au seul capital économique des ménages.

Dans la ville, l'articulation essentielle est celle entre production-échange et habiter

Nous revenons alors à la question fondamentale posée par Roncayolo (1996) : l'organisation spatiale de la ville s'articule avec un principe unique ou bien des principes concurrents de l'organisation sociale ?

Deux fonctionnements socioéconomiques sont fondamentaux dans la ville : d'un côté celui de la production et de l'échange des biens et de services, de l'autre celui de l'habiter.

Le parallèle est avec la dichotomie fondamentale de l'analyse marxiste entre rapports de production et les autres rapports sociaux, qui incluent la reproduction sociale dans la famille comme dans les institutions, les idéologies, les cultures (voir supra). Une lecture grossière de la part d'une certaine école marxiste a décrété la primatie des rapports de production, qui déterminerait en dernière instance les superstructures du vivre social. En réalité Marx propose une vision beaucoup plus nuancée de véritable dialectique entre ces deux aspects de l'organisation socioéconomique, surtout dans l'analyse de cas concrets.

On accorde ainsi souvent un rôle de moteur premier à la division technique (l'affectation fonctionnelle des sols), ensuite à la division sociale du travail (les hiérarchies économiques), pour terminer sur les aspects liés à la reproduction sociale et culturelle de l'habiter. Sinon que même la division technique de l'espace urbain a lieu dans un espace déjà socialement divisé et représenté. Roncayolo (1996) souligne justement que les activités se classent socialement dans l'espace urbain et classent socialement les espaces. La localisation d'une usine ou d'un équipement technique n'est ainsi pas déterminé par les seules contraintes techniques (comme l'accessibilité aux transports), mais prend en compte également les proximités relatives aux tissus résidentiels, plus ou moins valorisés, aux espaces symboliques de la ville et du paysage environnant, qui sont à leur tour le produit de constructions sociales.

Selon Caniggia et Maffei (1979), déjà dans la ville auto-organisée du moyen-âge européen, les activités urbaines pouvaient se classer en nodales et anti-nodales, les premières étant socialement valorisées (les églises, les palais des élites urbaines, les lieux symboliques du pouvoir communal, le commerce, etc.), les secondes, tout-aussi nécessaires à la vie urbaine, étant plus répulsives dans la représentation sociale de l'époque (les hôpitaux, les couvents, les lavoirs publics, les ateliers artisanaux les plus polluants, etc.). L'organisation spatiale de la ville prenait en compte cette double nature des activités urbaines en facilitant leur agglomération autour d'axes et de nœuds de polarité positive et négative, introduisant ainsi des « coloriations » socio-fonctionnelles au sein d'organismes urbains que nous tendons aujourd'hui à considérer comme étant socialement et fonctionnellement mixtes. Les axes nodaux et anti-nodaux s'alternent effectivement à très petite échelle dans les tissus urbains traditionnels, et continuent à le faire même lorsque ces tissus sont intégrés dans des plus vastes organismes urbains.

Ce qui est propre à l'organisation métropolitaine contemporaine est l'étendue spatiale des spécialisations socio-fonctionnelles attractives et répulsives, dans la mesure où des vastes secteurs peuvent actuellement jouer le rôle d'espace nodal, socialement valorisé, ou anti-nodal, et donc socialement dévalorisé. Les centres-villes gentrifiés et touristifiés, les technopôles, les centres des affaires, les tissus résidentiels haut-de-gamme, ont pour revers de la médaille les vastes sous-espaces dévalorisés de la production manufacturière, de la concentration des équipements techniques (traitement des eaux usées, des ordures ménagères, centres logistiques, échangeurs autoroutiers, etc.), des cités de logements sociaux, etc. Mais la valorisation/dévalorisation des sous-espaces précède et souvent accompagne la logique d'implantation des activités et des populations, et ensuite interagit

avec les formes de l'organisation physique de la ville, qui peuvent à leur tour faciliter ou non le changement des usages et des représentations sociales.

Des mutations s'observent par ailleurs dans le type d'activités économiques qui deviennent prépondérantes au sein des agglomérations. L'activité manufacturière lourde et la grande logistique (ports commerciaux, aéroports) tendent à sortir des agglomérations et les métropoles contemporaines deviennent de plus en plus tertiariées. La forte présence de l'industrie dans la ville semble avoir été une parenthèse dans l'histoire urbaine, surtout en Europe (J. Lévy 1999), liée au XIX^e et au XX^e siècle. La ville contemporaine retrouverait ainsi son rôle plurimillénaire de concentration d'activités commerciales et de production de services, même si dans un contexte marqué par la métropolisation (Meyronin 2003).

De cette rapide incursion dans la théorie sociale de l'urbain, nous retiendrons la pluralité et l'interaction des logiques socioéconomiques de l'espace urbain. Ce dernier n'est ni unidimensionnel (avec la logique économique des activités commandant la logique de l'habiter), ni purement bidimensionnel, avec deux logiques indépendantes pouvant donner naissance à toute combinaison possible. En effet l'espace urbain est valorisé et intériorisé par ses acteurs et devient le lieu de rencontre et d'opposition entre systèmes de valeurs différents.

L'étude des rencontres et des oppositions entre les acteurs sociaux porteurs de ces valeurs fait l'objet plus spécifiquement des recherches de la géographie sociale et culturelle de la ville. Quel en est alors l'intérêt dans mon agenda de recherche, qui souhaite approfondir le rôle de la spatialité dans la complexité urbaine, et qui ne pose pas le jeu des acteurs sociaux au centre de ses investigations ?

Dépasser l'aporie de la spatialisation de phénomènes a-spatiaux

Pour comprendre mon intérêt à cette question, nous devons aborder la seconde critique, tout aussi fondamentale, au fait de voir l'organisation spatiale de la ville comme une projection de principes d'organisation socioéconomique.

La science régionale et une certaine géographie quantitative ont parfois proposé un dangereux raccourci intellectuel en donnant l'impression d'étudier d'abord des processus socioéconomiques bien identifiés et de rechercher ensuite les modalités du déploiement de ces processus dans l'espace. L'espace serait ici conçu comme un espace support, abstrait, cartésien, où éventuellement se localiseraient d'autres phénomènes (topographiques, hydrographiques, culturels) et qui, au-delà de l'interaction avec ces autres phénomènes localisés, jouerait essentiellement un rôle de « porteur de distance » vis-à-vis des processus étudiés. J'ai déjà souligné comment il serait réducteur de la complexité spatiale de la ville que de réduire sa spatialité à une question de distance. Je souhaiterais maintenant montrer comment cette conception d'espace support neutre générateur de distance peut produire une véritable aporie scientifique dans l'étude du rapport entre spatialité de la ville et fonctionnements socioéconomiques.

Un des premiers géographes à avoir attaqué la conception naïve d'un espace absolu cartésien générateur de distance est D. Harvey, dans son *Explanation in Geography* (Harvey 1969), lorsqu'il était encore dans la mouvance quantitativiste. Harvey a ultérieurement développé sa critique dans son passage à la géographie radicale (Harvey 1973, 1985).

Dans la fondation de l'approche configurationnelle à la forme urbaine, Hillier et Hanson (1984) posent le problème de fond : l'économie, la sociologie et l'anthropologie conceptualisent des sujets a-spatiaux et ensuite posent le problème de leur relation avec l'organisation purement physique d'objets spatiaux. Ainsi faisant, elles dé-spatialisent la société et dé-socialisent l'espace. Cette mauvaise

représentation du problème le rend insoluble car elle oublie la principale caractéristique de l'espace urbain, qui n'est pas un espace absolu, simple porteur de distance. Comme le souligne Morin, la réalité phénoménologique est celle d'un tout, d'une organisation socio-spatiale (ici celle de la ville) qui ne se laisse pas réduire aux seules relations sociales ni aux seuls rapports spatiaux. Hillier et Hanson identifient alors ce qui est propre à l'espace urbain : il canalise le mouvement de ses usagers et par là il crée des *patterns* de rencontre ou d'évitement. Structurant le processus, autrement aléatoire, du mouvement des habitants et des usagers de la ville, il facilite certaines opportunités de rencontre ou en rend plus difficiles d'autres, simplifiant par-là les opportunités de contrôle de ces rencontres. Ainsi faisant, l'espace urbain est déjà un phénomène social. Il participe à la dynamique sociale et est le produit de la dynamique sociale. Ses implications sur l'ensemble du fonctionnement socioéconomique de la ville seraient alors étroitement liées aux propriétés syntactiques des relations spatiales entre les éléments de forme. Créer un réseau d'avant-plan concentrant les espaces à plus forte centralité (locale et globale), interconnecté aux espaces interstitiels du réseau d'arrière-plan, moins perceptibles et accessibles, est déjà une structuration socioéconomique de l'espace. Cette structuration permet de catalyser des activités sensibles à la présence du mouvement (le commerce, les services) sur le réseau d'avant-plan, et des espaces plus résidentiels, mais à portée piétonne de ces activités, sur celui d'arrière-plan.

L'espace urbain constitue ainsi une organisation sociale en soi ou, au moins, un des différents principes de l'organisation sociale au même titre, par exemple, que la division sociale du travail. On réduirait considérablement son rôle si on le limitait, comme certains sémiologues de l'architecture le font, à une simple représentation de l'ordre social. Sans nier le rôle représentatif que certains choix stylistiques peuvent avoir dans l'architecture des bâtiments ou dans l'aménagement des espaces publics (Benevolo 1993, 2001), la spatialité propre à la ville, qu'elle soit le fruit d'un plan d'ensemble ou de l'auto-organisation cumulative de ses habitants, est porteuse en soi de finalités sociales qui participent à la définition même d'une société urbaine.

Une vision d'ensemble : caractéristiques des lieux et construction sociale de la ville

Comme tous les collectifs, les lieux qui composent la ville sont dotés d'attributs nouveaux qui ne sont pas directement mesurables dans les éléments qui les constituent. Je souhaiterais ainsi donner une vue d'ensemble des différentes propriétés qui peuvent caractériser un lieu donné au sein de la ville, croisant les regards de tous les auteurs que nous venons de considérer : des pères fondateurs de l'écologie urbaine à Hillier et Hanson, en passant par Roncayolo, Halbwachs, Merton, Harvey, etc.

Ces propriétés peuvent avoir trois origines différentes :

- D'abord, et c'est la lecture la plus évidente, il s'agit des caractéristiques des individus et des composantes physiques et fonctionnelles qui y sont présentes, je les appellerais ainsi **caractéristiques intrinsèques des lieux**. Une fois que nous avons défini la granularité spatiale de nos lieux, et donc un découpage opérationnel de l'analyse urbaine, il s'agit de caractériser la composition socio-professionnelle des habitants de chaque unité spatiale, le type de bâtiments présents, la présence/absence de certaines fonctions, etc. Facilement cartographiables et analysables (même si des procédures plus ou moins complexes de géostatistique peuvent être nécessaire pour établir la significativité de valeurs particulières) ces caractéristiques intrinsèques répondent au besoin de spatialisation de phénomènes conçus indépendamment de la spatialité urbaine. A ce stade de la description, ce qui est comptabilisé dans une unité spatiale ne l'est pas en fonction de ce qui existe dans les autres unités spatiales.

- Ensuite, nous avons les caractéristiques découlant des rapports réciproques avec les autres sous-espaces, et cela à plusieurs échelles. Je les identifie comme étant des **caractéristiques extrinsèques des lieux**, et j'y inclus les propriétés syntactiques de Hillier et Hanson. Il peut ainsi s'agir d'une position géographique, d'un rôle d'interface, d'une propriété configurationnelle (syntactique) que ses éléments de forme ont au sein de l'espace urbain, d'une accessibilité relative, d'une relation inter-scalaire, etc. ; à l'échelle la plus menue, si les lieux sur lesquels nous portons notre attention (les unités spatiales) sont des segments de rues ou des bâtiments pris singulièrement, même les caractéristiques du tissu urbain dans lequel ils se situent deviennent une caractéristique extrinsèque, quand bien même les rapports réciproques ici pris en compte se limitent à leurs voisins les plus proches. Ces caractéristiques sont essentiellement géographiques, c'est-à-dire liées à la situation dans une organisation spatiale. Les opérations qui permettent de les évaluer ne sont pas la simple spatialisation de phénomènes a-spatiaux, mais des calculs relativement sophistiqués révélant ce qui émerge de la prise en compte d'un système complexe de relations spatiales.
- Finalement, nous avons les caractéristiques relevant des représentations sociales que les individus et les groupes se font des espaces. Il s'agit des **caractéristiques intériorisées des lieux**. L'approche se fait ici plus herméneutique, car il s'agit de comprendre la codification culturelle et sociale des lieux et de leurs caractéristiques objectives par un groupe humain, par le biais de comportements observés, un corpus de production culturelle, où alors par des enquêtes et des entretiens. La géographie théorique et quantitative a traditionnellement délaissé ces aspects, mais les avancées dans les méthodes de représentation et d'analyse ainsi que des ouvertures vers la géographie sociale et culturelle permettent d'ouvrir des pistes de recherche particulièrement prometteuses, comme le fut le travail de C. Cauvin (1984) sur la représentation sociale de l'espace urbain par le biais de cartes mentales.

Raisonnement sur ces trois niveaux et sur leurs relations, c'est raisonner également sur les imbrications entre les comportements individuels (éventuellement par rapport à des normes sociales) avec les caractéristiques des lieux. La posture du géographe est désormais bien loin du déterminisme naïf de la géographie positiviste. Dans un espace urbain, on ne peut pas accepter aussi simplement que les lieux fassent les hommes (et, en passant, les femmes) car les lieux sont à leur tour le produit de ces mêmes acteurs urbains. Néanmoins, le jeu des temporalités différentes entre la fabrication de la ville et les fonctionnements humains de la ville, permet d'identifier des conditionnements, plus ou moins directs car souvent filtrés par les représentations sociales, des caractéristiques intrinsèques et extrinsèques des lieux sur les fonctionnements des acteurs urbains. Ici, le renouveau des approches configurationnelles a été surtout la mise en exergue du rôle de la spatialité, et donc des caractéristiques extrinsèques, moins saillantes pour l'observateur superficiel.

Surtout, le géographe évitera les erreurs écologiques, en passant du niveau d'explication du fonctionnement des lieux à celui de l'explication du comportement individuel. Si le déterminisme n'est plus de mise dans le rapport entre formes et fonctionnements, devant être substitué par des relations beaucoup plus complexes de propensionnisme, possibilisme et, éventuellement, sous-détermination, le passage à l'explication du comportement individuel serait totalement injustifié. Même dans l'hypothèse, qui resterait à démontrer, que les mécanismes identifiés au niveau des collectifs puissent agir également au niveau individuel, l'indétermination serait bien majeure à ce niveau qu'à celui des lieux et des agrégats. Un positionnement configurationnel avantageux pour une rue donnée dans la ville, peut jouer un rôle clé dans son succès en tant que rue commerçante, mais ne saurait pas, à lui seul, expliquer le succès ou l'échec de tel ou tel magasin particulier.

Sur le temps long, on peut également identifier une dialectique entre les caractéristiques objectives des lieux (intrinsèques et extrinsèques) **et les représentations sociales** (les caractéristiques intériorisées des lieux), qui guident les processus décisionnels des acteurs urbains. Il peut y avoir accentuation lorsque la représentation sociale va bien au-delà des caractéristiques objectives des lieux. Ou bien, il peut y avoir décalage dans le temps, lorsque la représentation n'est plus en adéquation avec les caractéristiques objectives, car ces dernières ont évolué dans le temps sans que les représentations sociales soient remises en discussion... jusqu'au jour où un réalignement se produit, de façon plus ou moins soudaine. Ces effets de renforcement/amointrissement, ces décalages, ces réalignements brusques, et leurs effets sur les processus décisionnels et, in fine, la fabrication incrémentale de la ville, rendent d'autant plus complexe la relation entre les dynamiques sociales et les dynamiques de l'organisation spatiale de la ville.

Plusieurs hypothèses pourraient également être formulées sur le rôle de la métropolisation au sein de ce schéma (Castells 2002, 2008). L'importance des caractéristiques extrinsèques des lieux pourrait ainsi augmenter, car le système spatial augmente de dimension, la mise à système des lieux (surtout réticulaire) s'intensifie et la hiérarchisation des propriétés configurationnelles se renforce (loi de puissance oblige). En même temps, le renforcement de la symbolique des lieux (par exemple celui des centralités anciennes ou nouvelles sur un vaste espace métropolitain), l'accélération et la pervasivité du marketing territorial, mais également la rapide émergence de perceptions sociales partagées grâce aux réseaux sociaux, contribueraient à augmenter le rôle des caractéristiques intériorisées. C'est bien dans cette direction que vont les réflexions de Bassand (2001) sur la médiatisation des perceptions sociales et l'augmentation du nombre d'acteurs concernés (habitants, usagers métropolitains, touristes, touristes d'affaires) dans la cosmopolitisation sélective des espaces publics en contexte métropolitain.

La question de la fabrication incrémentale de la ville est également importante. L'espace urbain est bien construit par les acteurs urbains et cette fabrication est une construction sociale, car l'organisation physique de l'espace urbain a déjà une signification sociale et matérialise les schémas socioculturels que les acteurs ont de l'organisation spatiale sur laquelle ils interviennent. Or, sauf cas exceptionnel (ville de nouvelle fondation, reconstruction de la ville après une catastrophe naturelle ou une destruction de guerre), cette construction est toujours incrémentale. Ménages, promoteurs, urbanistes peuvent modifier à la marge la ville héritée du passé, en rajoutant des éléments, en en modifiant d'autres, etc., mais ils n'ont pas la possibilité de redéfinir en même temps toutes les caractéristiques intrinsèques et extrinsèques de tous les lieux de la ville. Encore plus, comme j'aurai l'occasion de souligner dans le Chapitre 5 en abordant la question de la résilience urbaine, ces formes héritées ont déjà des caractéristiques intrinsèques et extrinsèques, leur histoire de représentations sociales et leur capacité à être plus ou moins réadaptées et réinterprétées.

Le schéma que j'aime utiliser pour résumer ces relations existant entre les caractéristiques des lieux, leurs représentations sociales et la fabrication de la ville est celui en Figure 3.8. Il s'inspire d'une schématisation déjà proposée par Roncayolo (1996) mais la complexifie de façon substantielle en introduisant comme élément central ce qui relève plus intimement de la spatialité de la forme et des fonctionnements urbains.

Dans ce schéma on notera comment la répartition dans l'espace des hommes, des activités et des éléments de la forme physique est, certes, perçue par les acteurs, mais également perçue par le biais d'un filtrage socioculturel qui assigne déjà des valeurs aux éléments perçus. Les caractéristiques extrinsèques des lieux, celles liées à la spatialité de la ville, ne sont pas perçues de la même manière : nous ne percevons pas de façon aussi directe une caractéristique configurationnelle ou un rôle

d'interface, nous en faisons une expérience pratique, nous la ressentons, et nous avons souvent du mal à expliciter de façon analytique ces caractéristiques. Ce qu'il est important de retenir ici est qu'il existe des fondements objectifs des représentations sociales, faits de propriétés objectives des lieux et pas seulement de valeurs symboliques qu'ils représenteraient, même si ces propriétés sont perçues et vécues dans le contexte d'une culture urbaine donnée. **Les décisions des acteurs, prises sur la base des représentations sociales, construisent la ville de façon incrémentale. Or, cette construction est directe en ce qui concerne les caractéristiques intrinsèques des lieux** (on rajoute ou on enlève un bâtiment, une activité, un ménage d'un lieu donné), **elle est beaucoup plus indirecte en ce qui concerne les caractéristiques extrinsèques** : ces dernières dépendent des éléments présents dans tous les lieux liés entre eux, évoluent de façon beaucoup plus complexe et non linéaire et sont éventuellement modifiables plus par le rajout/suppression de connexions (venant modifier les configurations) que par le rajout/suppression d'objets dans l'ensemble des lieux de la ville. **Cette vision relationnelle et configurationnelle de la ville a fait cruellement défaut à l'urbanisme moderne et à l'aménagement fonctionnaliste de la ville.** Au-delà de quelques considérations très générales sur les centralités (souvent basées sur les axiomes de la théorie des lieux centraux et pas sur une vision configurationnelle de centralité comme propriété émergente), l'urbanisme fonctionnaliste s'est souvent limité à allouer les sols et les ressources dans la ville (tant d'activités ici, tant de logements là-bas, tant d'espace verts dans cet autre secteur). Il s'est ainsi concentré sur la spatialisation des phénomènes et est complètement passé à côté de ce qui est le plus spécifique à la construction de la ville, sa spatialité.

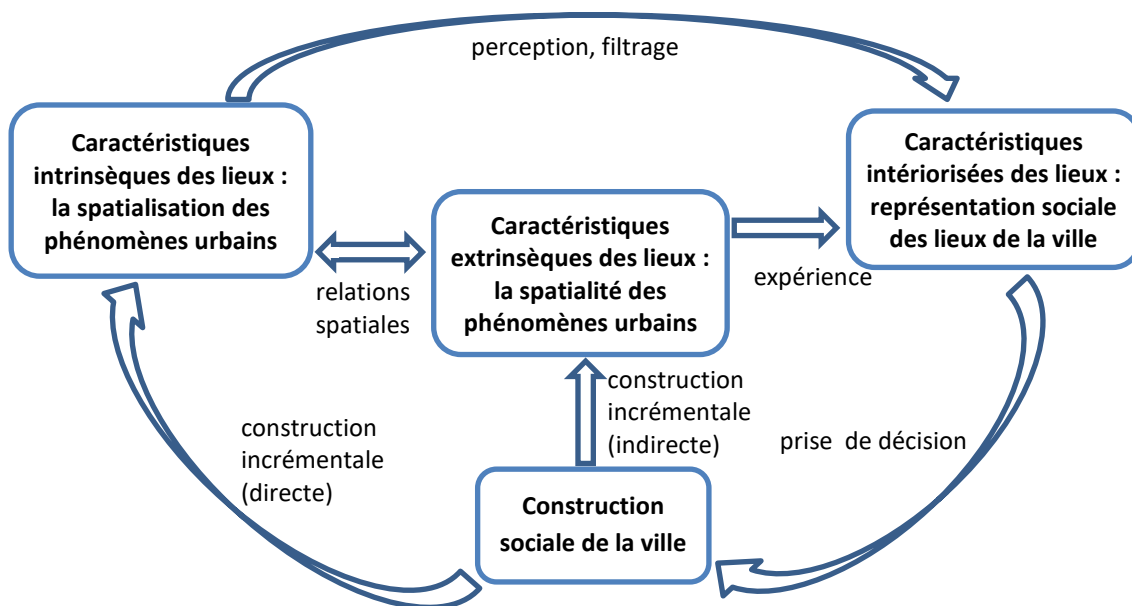


Figure 3.8 – Caractéristiques des lieux et construction sociale de la ville.

La contribution de l'école de la morphologie urbaine et des *patterns* de C. Alexander dans ce domaine a été de montrer comment les solutions vernaculaires, en codifiant des ensembles de relations spatiales entre les éléments construits, assuraient par ce biais la cohérence spatiale des interventions ponctuelles. Vécues comme des contraintes à la rationalité optimisatrices où à la créativité du designer, l'urbanisme moderne a supprimé cette codification vernaculaire sans la substituer avec d'autres mécanismes de contrôle de la cohérence spatiale. Le résultat a été souvent la

production de pans entiers de ville aux caractéristiques extrinsèques très pauvres et à peine suffisantes à permettre l'installation des fonctions pour lesquelles ces espaces avaient été conçus, bloquant par là toute diversification fonctionnelle et adaptabilité morphologique.

3.7 Les relations forme-fonctionnement en contexte métropolitain à l'épreuve des faits

Trois recherches empiriques sur la relation forme-fonctionnement

Dans cette section, je présenterai trois recherches qui m'ont permis d'explorer les relations multiples existant entre les formes urbaines et les fonctionnements humains de la ville. Elles ont permis d'opérationnaliser les considérations théoriques de la section précédente, et même de proposer des nouveaux concepts, plus spécifiques aux domaines étudiés.

Les deux premières recherches portent plus directement sur la morphologie sociale des aires métropolitaines, notamment par l'étude des logiques spatiales de l'habiter. Seront ainsi investiguées, à tour de rôle, les trajectoires résidentielles des accédants à la propriété dans un espace métropolitain et, de façon plus exhaustive, la relation entre caractéristiques des lieux et modes d'habiter des populations. Ces deux recherches proposent des nouveaux concepts, tels que le profil sociogéographique des ménages et l'affordance spatiale des lieux, et font recours à des corpus de données différents : dans le premier cas, des corpus réduits d'entretiens semi-directifs, avec une grille d'analyse qualitative des caractéristiques des lieux observables sur le terrain ; dans le second, des grandes enquêtes, couplées à des bases de données permettant d'appréhender les caractéristiques des lieux.

Les deux recherches feront en revanche recours à la même technique de clustering probabiliste bayésien, pour identifier des profils généralisant les observations individuelles. L'approche méthodologique est ainsi inductive (tout en étant guidé par des présupposés théoriques) et à base d'incertitude. Les fondements théoriques et méthodologiques du clustering bayésien et leurs liens avec la connaissance incertaine seront mieux présentés dans le Chapitre 4. Je me limiterai ici à commenter les résultats obtenus et leur éclairage des relations multiples existant entre les formes physiques de la ville et les morphologies sociales dans un contexte métropolitain.

La troisième recherche étudie la relation entre forme urbaine et fonctionnements commerciaux de la ville. La forme est analysée essentiellement par une approche configurationnelle des réseaux viaires et des réseaux routiers, couplant ainsi les logiques du mouvement piéton et automobile pour comprendre le potentiel commercial des rues. Comme déjà souligné par une riche bibliographie (Jacobs 1961, Hillier 1996, Cutini 2001, Porta et al. 2009, Porta et al. 2012), les activités commerciales sont en effet particulièrement sensibles à la structuration du mouvement potentiel des usagers de la ville, liée à la configuration des réseaux. Plus précisément, Hillier (1996, 2002, 2012) suggère que les commerces et les services sont des activités attirées par le mouvement (vers et à travers), tandis que les résidences, en seraient davantage repoussées (selon un jeu de perceptions sociales qui trouve toute sa place dans le schéma en Figure 3.8).

Un cadre probabiliste bayésien sera également employé, mais cette fois les réseaux bayésiens serviront à identifier des relations causales entre phénomènes dans un cadre théorique préalablement établi. Ils auront le même rôle que les analyses de régression multiple ou les réseaux de neurones régressifs, laissant seulement plus de place à l'incertitude probabiliste dans l'identification du meilleur

modèle explicatif. Des différentes paramétrisations de la recherche découlera une pluralité de modèles possibles, soulignant le caractère doublement incertain des connaissances produites par ces approches de fouille de données.

Les profils sociogéographiques, croisement de trajectoires résidentielles, motivations et modes d'habiter

Les collectivités locales sont confrontées à des énormes défis dans le contrôle du développement métropolitain. L'étalement périurbain, la densification, le délabrement ou le renouveau des centres traditionnels se présentent comme les résultats de différentes politiques urbaines. Mixité sociale ou ségrégation résidentielle semblent également pouvoir être gérées par des politiques appropriées. Mais dans les faits, ces politiques sont contrecarrées par le comportement des agents qui interagissent avec les formes de la spatialité métropolitaine, dans des processus d'auto-organisation qui restent à élucider. Les stratégies des ménages pour accéder à la propriété de leur logement jouent un rôle important dans ces processus et encore plus dans un contexte métropolitain où les centres-villes, le périurbain et les villages ruraux constituent des marchés résidentiels qui se chevauchent, produisant d'importantes migrations résidentielles intra-métropolitaines. Il devient ainsi essentiel d'étudier l'imbrication des préférences, des styles de vie et des motivations des ménages avec les contraintes objectives de l'accès à la propriété (Kauko 2006, Aero 2006, Rougé 2007). Mais l'analyse ne peut pas demeurer uniquement socioéconomique et doit intégrer explicitement les éléments du contexte spatial qui constituent un aspect essentiel des décisions prises par les ménages (Da Cunha et al. 2004, Debusschere 2005, Skifter Andersen 2011, Carpentier 2010), tous comme les éléments qui décrivent leurs pratiques de mobilité quotidienne et hebdomadaire (Kaufmann 2000, Rougé 2007, Carpentier 2007, 2010). Les bases de données traditionnelles sur les marchés immobiliers décrivent les caractéristiques des biens et, par leur localisation, permettent de reconstruire les accessibilités dont ils bénéficient et, plus difficilement, les formes urbaines où ils se situent. Elles ne nous renseignent pas, cependant, sur les préférences, les pratiques spatiales et les motivations des accédants à la propriété. Ces données doivent être produites dans des plans de recherche spécifiques, ouvrant la voie à des nouvelles applications modélisatrices intégrant à la fois des descripteurs quantitatifs et qualitatifs des comportements de ménages.

J'ai ainsi eu l'occasion de co-piloter un projet interdisciplinaire (Donzel et al. 2011) fédérant sociologues (UMR LAMES / Aix-Marseille Université et VECT Mare Nostrum / Université de Perpignan) et géographes (UMR ESPACE / Université de Nice Sophia Antipolis). Son objectif était d'étudier les déterminants et les motivations des nouveaux accédants à la propriété dans les contextes urbains et métropolitains du sud de la France. La recherche était exploratoire : des nouvelles questions ont été formulées et testées sur des petits échantillons de ménages. Trois terrains ont été sélectionnés : les aires métropolitaines provençale et azuréenne et la plus petite région urbaine autour de Perpignan. Un protocole d'entretien semi-directif a été élaboré pour interviewer 160 ménages ayant acheté leur logement dans la décennie précédente. Mes recherches (Fusco et Scarella 2012, 2014) se sont focalisées sur les deux terrains métropolitains, où des nouvelles méthodologies pour le traitement numérique de corpus d'entretiens et d'enquêtes ont été mises au point, en combinant les aspects subjectifs relevés par les entretiens avec l'information spatiale extraite de l'insertion et de la trajectoire résidentielle des ménages. **L'objectif était d'identifier des profils sociogéographiques cohérents permettant de segmenter les nouveaux accédants à la propriété au sein des deux aires métropolitaines.** La cohérence devait résulter de la possibilité d'identifier des régularités statistiques dans l'association de préférences révélées, des comportements, des conditions socio-économiques et de l'inscription spatiale des mobilités résidentielle, quotidienne et de loisir. La décision de devenir

propriétaire dans un secteur géographique particulier pouvait ainsi être considérée dans le contexte plus large des styles de vie, dépassant les considérations contingentes des seuls aspects des coûts, des logements disponibles et des niveaux d'accessibilité (notamment au lieu de travail). En suivant Bourdieu (1979), les styles de vie sont des systèmes de pratiques socialement classifiables. Stock (2004) propose d'intégrer pleinement la dimension spatiale dans les styles de vie (les lieux utilisés pour effectuer les activités et les mobilités nécessaires entre eux) et propose pour cela le concept de « mode d'habiter ».

Sur ces bases, les hypothèses de fond de la recherche sont au nombre de trois. D'abord, la logique utilitariste de l'*homo economicus* postulée par la modélisation économétrique, peu sensible aux aspects symboliques et intériorisés des valeurs et des styles de vie des habitants, n'est probablement ni le seul ni le plus important patron de comportement des ménages. Ensuite, et ce d'autant plus que les autres logiques identifiables s'éloignent du froid arbitrage entre coûts et distances de la logique utilitariste, l'espace compte et il compte d'autant plus qu'il est saisi en tant que lieu, avec des caractéristiques objectives et d'autres, plus subjectives, liées à l'intériorisation de valeurs sociales et à la perception sociale des espaces. Une troisième hypothèse, plus contingente à nos terrains d'études, était de vérifier dans quelle mesure il existe des analogies entre ces deux aires métropolitaines de la France méditerranéenne.

La recherche de profils sociogéographiques permettait de tester ces hypothèses, au moins de façon préliminaire, en essayant de généraliser les logiques internes à chaque entretien. Les résultats doivent être compris comme exploratoires dans la mesure où ils sont obtenus d'échantillons réduits de ménages. La recherche des profils sociogéographiques pose également des défis méthodologiques : d'abord l'intégration de la dimension spatiale en contexte métropolitain et ensuite le dépassement de la seule analyse qualitative de discours, qui peut difficilement opérer des généralisations dans des grands corpus.

Des profils sociogéographiques très semblables en Provence et sur la Côte d'Azur

Les recherches sur les réseaux urbains en région PACA, présentées au Chapitre 2, avaient déjà permis d'identifier l'émergence de deux aires métropolitaines polycentriques dans l'espace régional. A l'ouest, la métropole provençale était traditionnellement articulée autour des deux pôles de Marseille et Aix-en-Provence, mais intègre de plus en plus Toulon et Avignon. À l'est, la métropole azurée se structure autour des quatre villes littorales de Nice, Monaco, Antibes et Cannes. Dans la Section 2.3 j'ai montré la difficile question de la délimitation de ces deux aires métropolitaines. En utilisant ici une délimitation relativement ample, la métropole azurée inclut le département des Alpes-Maritimes, l'Est-Var et la Principauté de Monaco et avoisine dans ce périmètre 1,5 millions d'habitants. S'étendant sur plus de 150 km d'est en ouest, la métropole provençale compte environ 3 millions d'habitants, dont les deux tiers sont dans le département des Bouches-du-Rhône.

Au-delà des fortes similitudes (dans les contraintes topographiques, le rôle attractif du littoral, la fragmentation de la gouvernance métropolitaine, le poids de la propriété immobilière et l'appartenance à la même culture méditerranéenne française) les deux cas d'étude offrent une opportunité intéressante d'analyse comparative. Les formes urbaines et les fonctionnements socioéconomiques du port et de la vaste zone industrielle au nord de Marseille n'ont par exemple pas de correspondant dans l'aire azurée, où l'économie touristique et résidentielle est beaucoup plus prégnante. D'importantes différences caractérisent également le parc de logements, avec une plus forte présence de résidences secondaires et d'appartements dans l'aire azurée. De surcroît, les quatre principaux pôles métropolitains azuréens sont tous littoraux, tandis que le polycentrisme

provençal s'étend à l'intérieur des terres. La seconde ceinture métropolitaine provençale (voir suite) inclut également des petites villes, avec une offre de logements en contexte urbain (comme à La Ciotat, Manosque ou Arles), là où la seconde ceinture azuréeenne consiste uniquement de lotissements périurbains ou de villages anciens dans le contexte urbain de l'arrière-pays alpin. Il devient dès lors intéressant de vérifier dans quelle mesure ces différences structurelles dans les marchés résidentiels et dans les configurations métropolitaines peuvent influencer les stratégies résidentielles des ménages accédant à la propriété. Le rôle des contraintes financières sera également pris en compte, ces deux aires métropolitaines étant parmi les marchés résidentiels les plus tendus en France, après Paris. Il faut ainsi comprendre comment ces contraintes objectives interagissent avec les aspects socio-culturels pour identifier des profils sociogéographiques d'accédants, spécifiques à ces terrains d'étude. Seulement un corpus d'entretiens suivant un protocole spécifique à cette recherche pouvait en effet intégrer tous ces aspects.

Au sein des deux structures métropolitaines polycentriques, nous avons différencié les communes-centre des principaux pôles métropolitains, leur première couronne (espace à moins de 20 minutes par le réseau routier) et la seconde couronne, plus éloignée dans l'espace-temps métropolitain. L'échantillon des ménages interviewés (54 dans l'aire azuréeenne, 59 dans celle provençale) ont été stratifiés par ce découpage géographique (Figure 3.9) et par les trois grandes classes d'âges de la personne de référence (moins de 40 ans, 40-60 ans et plus de 60 ans). Le corpus des retranscriptions des entretiens n'était que le matériel brut de l'application modélisatrice. Une grille d'analyse a ainsi permis d'évaluer un ensemble de 46 variables, essentiellement qualitatives ou catégorielles :

- 6 variables factuelles sur le ménage (revenus, composition et nombre d'actifs, âge, classe socioprofessionnelle, région de naissance de la personne de référence) ;
- 4 variables pour la localisation du logement présent et précédent à la fois à l'échelle métropolitaine (centre, première ou seconde ceinture) et, plus localement, en termes de caractéristiques morphologiques du quartier (centre-ville, banlieue urbaine, périurbain, village). Une des spécificités de nos aires métropolitaines est l'existence de contextes périurbains au sein même des communes-centres.
- 11 caractéristiques objectives du logement actuel (nombre de pièces, période de construction, type architectural, présence d'éléments de confort dans le logement et dans la copropriété/lotissement). Le logement précédent est aussi décrit par sa typologie et son nombre de pièces ;
- 4 variables pour les motivations révélées pour l'achat du logement, le statut d'occupation et l'éventuelle propriété d'une résidence secondaire ;
- 8 variables pour les contraintes financières et les modalités de l'acquisition (année d'achat, temps de recherche, recours à des intermédiaires, coût, prêt immobilier) et pour les travaux réalisés ;
- 6 variables pour les pratiques de mobilité des ménages (espaces visités pour les besoins du quotidien et pour les loisirs, navette domicile-travail, pratiques modales et motorisation) ;
- 7 variables sur les perceptions des ménages de leurs voisinage, engagement dans la vie locale, relations avec les voisins, satisfaction résidentielle et éventuels projets immobiliers futurs.

Le défi de généraliser les récits propres à chaque entretien et d'identifier des profils socio-géographiques dans les deux terrains d'étude a été relevé par le recours au clustering multivarié bayésien, selon l'approche hiérarchique présentée dans la Section 4.4. Six profils d'accédant ont pu être découverts dans l'aire azuréeenne et cinq dans celle provençale. Les profils sont plus ou moins recourant dans les échantillons, mais l'extrapolation de leurs fréquences à la population mère de tous les ménages ayant accédé à la propriété au cours de la décennie est extrêmement incertaine du fait de la petitesse de l'échantillon. L'analyse bayésienne permet de décrire en probabilité les principales

3. Forme et organisation spatiale de la ville complexe

caractéristiques de chaque profil, en faisant recours aux variables plus informatives pour chacun d'entre eux. L'inscription spatiale des trajectoires résidentielles des profils est essentielle pour les caractériser. Cela est fait dans les croquis de la Figure 3.10, représentant de façon schématique la spatialité des deux aires métropolitaines et les spécificités morphologiques locales de leurs composantes.

Un des principaux résultats de cette recherche est la similitude frappante des profils trouvés dans les deux aires métropolitaines. Si l'on regroupe les profils 2 et 4 de l'aire azurée, il y a une correspondance très prégnante avec les cinq profils de l'aire provençale. En analysant les profils plus attentivement, quelques différences peuvent néanmoins être observées, rendant la comparaison encore plus intéressante.

En dépit des mises en garde sur l'extrapolation des fréquences d'échantillon, le profil des familles périurbaines avec enfants, relativement aisées et à forte mobilité (n° 3) est tellement prépondérant dans l'échantillon provençal que l'on peut le qualifier de profil principal. Sur la Côte d'Azur, il correspond à deux différents profils, l'un caractérisant les familles de cadres et professionnels nouvellement installées (n° 2), l'autre les ménages locaux aisés ayant poursuivi le « rêve » d'accéder à la maison individuelle dans le périurbain. Deux profils urbains ont également été identifiés dans chacun des deux terrains : d'un côté les urbains aisés, faisant le choix d'un mode d'habiter citadin (urbanophiles), de l'autre des ménages plus modestes optant pour une localisation urbaine de façon relativement contrainte. Dans les deux terrains, deux derniers profils plus hétérogènes regroupent les ménages de classes moyennes préférant se localiser dans les périphéries urbaines : les premières comme choix de style de vie, les seconds sur des bases essentiellement utilitaristes. Les fortes similarités entre les profils des deux aires d'étude suggèrent que les résultats pourraient être plus robustes de ce qu'est impliqué par la petitesse des échantillons.

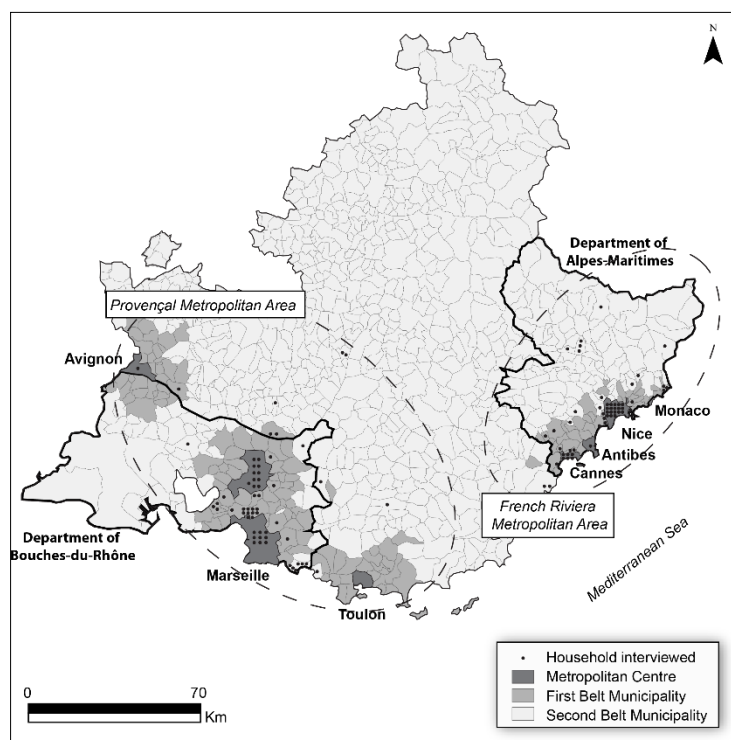


Figure 3.9 - Localisation de l'échantillon des ménages dans les deux aires métropolitaines.

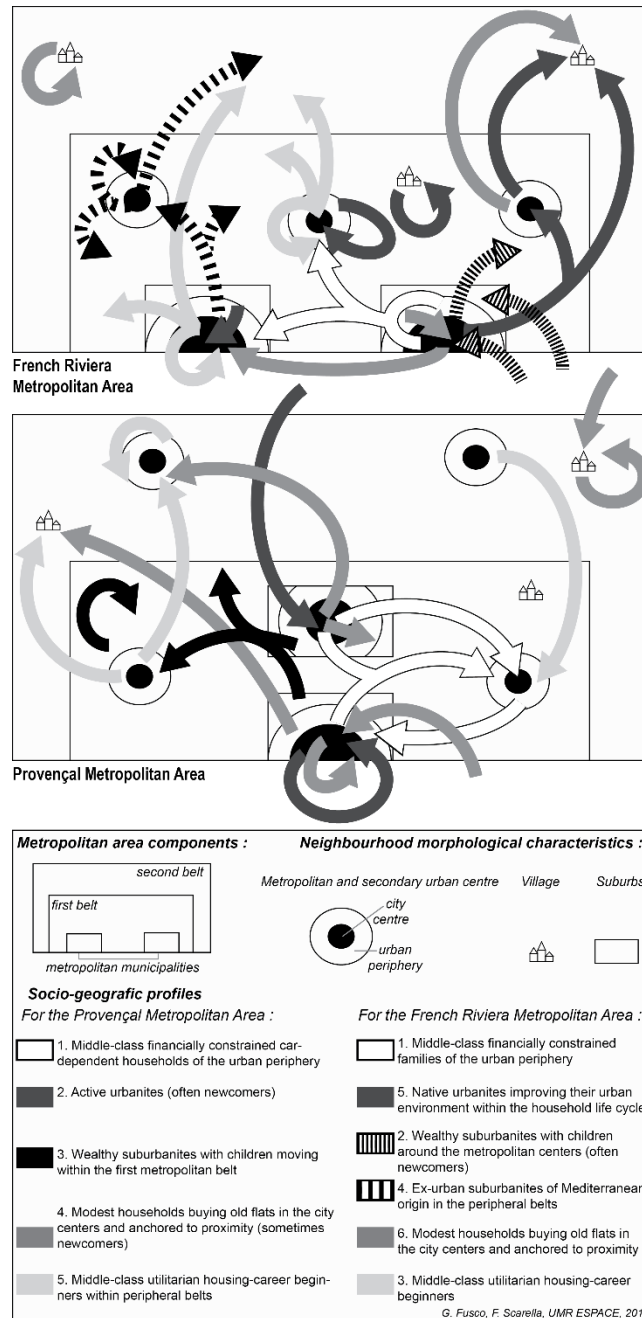


Figure 3.10 – Inscription spatiale des profils sociogéographiques.

Au-delà des nombreuses analogies entre les profils des deux aires d'étude, les différences dans les configurations métropolitaines, dans le parc de logement et dans les activités économiques prépondérantes ne peuvent que produire des divergences dans les préférences résidentielles et dans les modes d'habiter en Provence et sur la Côte d'Azur. Le mode d'habiter périurbain ou, à défaut, l'accès à un logement individuel en banlieue urbaine ont ainsi la tendance à agir comme une norme sociale pour les classes moyennes et moyennes supérieures dans la population locale provençale. Ainsi, dans les profils urbains nous trouvons souvent des nouveaux arrivants dans la région. Néanmoins, en Provence comme sur la Côte d'Azur, l'attrait des périphéries urbaines plus denses et fonctionnellement mixtes joue un rôle important dans la construction de certains profils. Les centres urbains restent des lieux attractifs, à la fois pour les choix résidentiels des citadins urbanophiles et pour

3. Forme et organisation spatiale de la ville complexe

les loisirs des ménages de banlieue et du périurbain. L'attractivité des centres urbains semble encore plus prononcée dans l'aire azurée, où une partie importante de la population locale tend à effectuer tout un parcours résidentiel au sein des espaces urbains agglomérés. Par ailleurs, les configurations métropolitaines polycentriques (avec quatre centres métropolitains et plusieurs centres urbains secondaires dans chaque aire d'étude) rendent les aménités urbaines plus facilement accessibles pour les ménages situés en périphérie urbaine et dans le périurbain.

Dans l'étude des parcours résidentiels des ménages modestes accédant à la propriété dans l'aire métropolitaine toulousaine, Rougé (2007) remarque la force de la norme sociale de la maison individuelle en contexte périurbain. Dans nos terrains, cette tendance est observable seulement pour les familles de classe moyenne (en Provence) et pour celles de classe moyenne supérieure (à la fois en Provence et sur la Côte d'Azur). Les accédants les plus modestes s'accommodent de logements collectifs anciens (même vétustes, avec un engagement important dans leur rénovation) dans les centres urbains et parfois dans les villages de la seconde ceinture métropolitaine. Ce faisant, ils bénéficient d'une plus grande liberté dans leurs pratiques de mobilité que leurs homologues toulousains, profitant des services disponibles localement dans ces espaces agglomérés et pouvant mieux arbitrer entre la mobilité automobile, les transports en commun et la marche. Pour les employés des classes moyennes, un appartement dans un bâtiment récent ou neuf en périphérie urbaine semble un choix socialement approprié dans les villes du littoral azuréen. Des modes d'habiter socialement valorisés urbains et périurbains sont ainsi présents en même temps dans les deux aires d'étude, avec une présence encore plus forte des modèles urbains dans l'aire azurée. Cela différencie par exemple nos deux aires métropolitaines méditerranéennes du cas du Luxembourg étudié par Carpentier (2010), où un gradient rural/urbain reflète la faiblesse de la ville-centre à catalyser des modes d'habiter urbains pour les ménages en position de choix résidentiel. Ces différences parmi les cultures urbaines régionales avaient déjà été relevées par Wiel (1999) sur des données plus générales. Les aires urbaines de la France méditerranéenne mélangent un modèle latin, de valorisation des résidences urbaines, avec le modèle de la maison individuelle périurbaine, une norme sociale qui s'était développée parmi les élites anglaises dès la fin du XVIII^e siècle pour s'imposer ensuite parmi les classes moyennes britanniques et nord-américaines pendant le XX^e (Mumford 1961).

L'augmentation effrénée des prix de l'immobilier dans le sud-est français entre 1998 et 2008 a également permis de faire émerger un profil particulier de ménages utilitaristes de classe moyenne, visant à prendre position dans le marché immobilier avant d'en être empêchés par l'augmentation continue des prix (une situation relativement commune à Paris). Ces mêmes ménages auraient probablement effectué des choix différents dans une phase de consolidation des prix, étant très attentifs à la signification de l'achat immobilier en tant qu'investissement rationnel. Ce profil utilitariste est le plus difficile à inscrire dans l'espace géographique, car il est moins lié à des caractéristiques précises des lieux qu'il investit.

Les résultats obtenus montrent ainsi l'intérêt d'une analyse croisée des conditions, des modalités et de motivation de l'accession à la propriété avec les pratiques sociales et spatiales des habitants ainsi que l'inscription géographique des localisations et des trajectoires résidentielles, prenant en compte à la fois le contexte morphologique local et de la situation dans l'espace métropolitain.

Nous avons également fait émerger quelques spécificités des deux aires métropolitaines méditerranéennes, liées à la fois à leur contexte culturel (qui est également l'héritage de leur histoire urbaine) et à leur organisation spatiale polycentrique : la présence de modes d'habiter socialement appréciés à la fois urbains et périurbains, avec leurs imaginaires et leurs symboliques respectives, la possibilité pour les accédants les plus modestes de tirer le meilleur parti possible de localisations

urbaines contraintes, en adoptant des modes d'habiter de proximité, la possibilité d'avoir un accès aisé aux aménités urbaines pour les périurbains (et aux aménités environnementales pour les urbains) du fait du polycentrisme, de la valeur symbolique et patrimoniale des centres anciens et de l'interpénétration des espaces urbains, périurbains et naturels. Clairement, ces aspects socio-culturels, plus qualitatifs, agissent en se combinant avec les contraintes financières des ménages et le temps d'accès aux emplois (au moins pour les actifs), mais ces contraintes ne sont déterminantes pour définir une stratégie d'accession à la propriété que pour un profil très particulier de ménages utilitaristes. Plus en général, la recherche montre la **nécessité d'analyser les caractéristiques intériorisées des lieux, à coté de celles plus objectives, dès lors que l'étude de la relation entre formes urbaines, organisation spatiale métropolitaine et fonctionnements humains souhaite porter la focale sur les comportements des acteurs** (ici les ménages).

Je reviendrai sur les apports méthodologiques de cette recherche dans la Section 4.4. Pour l'instant, on retiendra seulement que l'application proposée est plus un prototype de modélisation bayésienne qu'une analyse complète des profils d'accédants à la propriété dans les métropoles provençale et azurée. Elle montre en tout cas la possibilité d'identifier des profils avec une approche probabiliste et en atteignant une robustesse (ici évaluée qualitativement) qui semble être supérieure aux limites imposées par les faibles échantillons. La méthodologie montre également l'intérêt de l'interaction homme/machine dans l'analyse des données qualitatives d'entretiens. Cette approche pourrait être utilisée comme une heuristique pour identifier des profils-types avant une analyse de discours plus détaillée (Renkema 2004), ouvrant la voie à une recherche interdisciplinaire avec la sociologie urbaine.

Les morphologies métropolitaines et les modes d'habiter entretiennent des relations multiples

Dans la recherche sur les accédants à la propriété, le grain d'observation était le ménage situé dans un contexte spatial, permettant un trait d'union entre l'approche du sociologue et celui du géographe quantitativiste. Une seconde recherche (Fusco 2016) a en revanche directement abordé le lien entre forme urbaine et fonctionnements humains analysant une aire métropolitaine observées par le biais des unités spatiales qui la composent. Le point de départ de la réflexion était le rapport existant entre la forme urbaine et les comportements de mobilité des habitants. La recherche sur cette relation a une longue tradition. Les transformations des formes urbaines, des réseaux de transport (et de communication) et les comportements de mobilité nourrissent un vaste débat sur la métropole contemporaine (Wiel 1999, Ascher 1995, Castells 2002, 2008). En ce qui concerne la recherche empirique, Newman et Kenworthy (1989, 1998) ont été les premiers à souligner le rôle de la densité urbaine dans une comparaison internationale d'aires métropolitaines. Pour ces auteurs, la densité façonne à la fois l'offre de transports et les comportements moyens de mobilité dans l'espace urbain. Leurs recherches ont été suivies par différents développements (Naess 1995, Giuliano et Narayan 2003, Van de Coevering et Schwanen 2006) ainsi que par d'après critiques du fait du niveau très agrégé de l'analyse et de l'hyper-simplification des relations conceptuelles (et empiriques) entre les phénomènes (Gordon et Richardson 1989, 1997, Fouchier 1997). Inspirés par les travaux de Newman et Kenworthy, d'autres comparaisons internationales entre métropoles ont été conduites pour mieux spécifier l'enchaînement causal de l'interaction entre forme urbaine, transports et mobilité. En France, on peut citer les travaux de Le Nechet (2011) et mes propres recherches de doctorat (Fusco 2004). Les densités urbaines, l'offre de transport et les niveaux d'accessibilité ont également été étudié au niveau municipal au sein d'une aire métropolitaine (Camagni et al. 2002). Cervero et Kockelman (1997) analysent cette relation à un niveau encore plus local, en distinguant le rôle relatif de la densité, de la diversité fonctionnelle et de la composition urbaine à l'échelle des quartiers. L'impact de la configuration des réseaux viaires sur le choix modal, et plus particulièrement sur les habitudes de

marche, a également été étudié par des enquêtes spécifiques (Genre-Grandpierre et Foltête 2003, Rodriguez et Joo 2004, Piombini et al. 2014). Sur ces bases, aménageurs et urbanistes ont identifié des stratégies de composition urbaine pour favoriser ou limiter différents comportements de mobilité (Boarnet et Crane 2001). Plus en général, les données des enquêtes déplacements auprès des ménages, traditionnellement utilisées pour calibrer les plans de transport, ouvrent maintenant la voie à l'analyse de l'impact des formes urbaines sur les comportements de mobilité, tout en intégrant les caractéristiques sociodémographiques des ménages (Cervero 2002). Même à des échelles très fines, les liens causaux entre les variables en question ont été mieux explorés (Bagley et Mokhtarian 2002, Cao, Handy et Mokhtarian 2006, Lin et Yang 2009, Tran et al. 2014, Ramezani et al. 2017). La recherche dans ce champ est tellement vaste que des méta-analyses sont proposées pour résumer les résultats obtenus en lien avec différentes variables, méthodologies et aires d'étude. Ewing et Cervero (2010), par exemple, passent en revue les recherches basées sur des modèles régressifs des comportements de mobilité par rapport aux paramètres de forme urbaine au cours des années 90 et 2000.

Les avancées de la recherche empirique sur la connexion entre forme urbaine et comportement de mobilité des habitants ont ainsi identifié des élasticités des choix modaux et de destination pour différentes catégories de personnes, tout comme des formes favorisant l'utilisation des transports en commun, de l'automobile ou des modes doux. Je pense néanmoins que chercher d'identifier l'impact de chaque aspect de la forme urbaine sur les comportements des habitants (ce qui est l'objectif même des analyses de régression) ne devrait pas être la seule stratégie de recherche. Les différents aspects de la forme se combinent entre eux et avec d'autres caractéristiques fonctionnelles et perçues de l'espace urbain, créant de façon plus générale un « habitat » ou un « écosystème » pour les habitants des différents secteurs des villes et des métropoles. Celle de l'habitat est une vision systémique des éléments physiques, fonctionnels et perçus de la forme urbaine, qui tient compte du renforcement réciproque de certaines caractéristiques. Le concept d'une affordance physique plus générale caractérisant un habitat me semble alors une généralisation appropriée des capacités des formes à favoriser tel ou tel moyen de transport. En même temps, la mobilité doit être située dans le contexte plus général des styles de vie et des attitudes des habitants (Kaufmann 2000, 2007, Lanzendorf 2002, Urry 2007). Les comportements de mobilité sont une partie d'un style de vie plus général reflétant les habitudes, les attitudes, les valeurs et les aspirations des habitants. Les modèles économétriques commencent ainsi à aborder les liens entre styles de vie et comportement de mobilité (Pinjari et al. 2011).

Pour revenir au débat sur la métropole contemporaine, je pense que l'affordance des formes et les styles de vie peuvent donner un nouvel éclairage aux transformations les plus récentes des espaces urbains. La réorganisation des régions urbaines en aires métropolitaines intégrées, souvent définies comme processus de métropolisation (Ascher 1995, Lacour et Puissant 1999), produit en effet des nouveaux styles de vie basés sur l'hypermobilité (souvent dans la forme de la dépendance automobile) et à une pratique poly-topique de l'espace (Stock 2004). En même temps, la métropolisation modifie les caractéristiques physiques et fonctionnelles des composantes urbaines et rurales qu'elle englobe et élargi les périmètres traditionnels de l'urbain.

Il devient dès lors intéressant d'explorer les relations multiples existant entre l'affordance spatiale et les modes d'habiter des populations dans un contexte métropolitain donné. Le cas d'étude de la métropole azurée permettra d'avoir un premier retour d'expérience, montrant à la fois la diversité dans les caractéristiques des lieux et dans les modes de vie dominants des habitants de ces lieux.

L'affordance spatiale pour appréhender la spatialité du cadre de vie métropolitain

Le concept d'affordance fut introduit d'abord par Gibson (1979) en écologie environnementale. L'affordance est la caractéristique d'un objet à suggérer ses fonctionnalités et utilisations possibles par le biais d'éléments perceptibles par les usagers. L'affordance n'est pas une simple propriété de l'objet, car elle dépend aussi des tâches à accomplir et des capacités des usagers (Jordan et al. 1998). La définition de Gibson a été par la suite critiquée car elle se basait uniquement sur la perception des objets. Dans les situations réelles, les processus cognitifs jouent un rôle important dans la capacité des sujets à se projeter dans les utilisations possibles d'un objet.

Dans le but d'une analyse géographique, j'ai ainsi proposé le nouveau concept d'« **affordance spatiale** ». Elle est définie comme **l'ensemble des caractéristiques de l'espace géographique qui sont pertinentes pour effectuer des tâches complexes**, telles que nous les voyons émerger de la pratique d'une population donnée. Ma recherche s'est ici focalisée sur l'habitation de l'espace géographique (Stock 2004), qui est un parfait exemple d'un ensemble complexe d'actions et de pratiques, quotidiennes ou hebdomadaires, effectuées par les habitants : se loger, aller au travail, faire des courses, profiter du temps libre, visiter des lieux pendant le weekend, attribuer des valeurs et des significations à ces activités et aux lieux concernés. Habiter n'est pas liée à une simple perception de l'espace (comme pourrait être le cas de l'exploration de l'espace par les touristes). Il faut considérer une connaissance plus englobante des utilisations possibles de l'espace et, en ce qui concerne les espaces urbains (ou rurbains dans un contexte métropolitain), les aspects de forme urbaine et d'accessibilité y jouent un rôle fondamental. Il faudra clairement appréhender la forme urbaine au sens le plus large, en englobant l'ensemble des six registres identifiés, pour décrire, *a minima*, les formes physiques des tissus, les activités visibles, les centralités et les accessibilités, ainsi que l'offre de logements, à la fois en termes de typologies et de statuts d'occupation disponibles.

Les différentes manières d'effectuer l'ensemble complexe d'actions d'habiter l'espace géographique se combinent de façon spécifique pour produire des styles de vie. Nous avons vu que l'intégration de la dimension spatiale dans les styles de vie permet de passer au concept de « mode d'habiter » (Stock 2004). Or, les éléments observés dans cette recherche sont des unités spatiales, et pas des individus ou des ménages. Nous pouvons alors utiliser un second concept proposé par Stock : lorsqu'un mode d'habiter devient prédominant au sein de la population d'un territoire, on peut identifier un « régime d'habiter » pour ce territoire.

Il devient dès lors intéressant d'étudier la relation entre les régimes d'habiter et les aspects physiques et fonctionnels, les affordances spatiales, d'un territoire. Il ne s'agit clairement pas d'une simple relation de cause à effet. Les régimes d'habiter pourrait être tributaires de l'affordance spatiale, tout comme il pourrait contribuer à façonner la façon dont l'espace est perçu, socialement représenté et finalement transformé dans ses caractéristiques physiques et fonctionnelles (voir schéma dans la Figure 3.8). Le concept de lieu pourrait alors être utilisé pour englober l'association caractéristiques physiques et fonctionnelles avec les régimes d'habiter d'un espace donné. La géographie phénoménologique affirme que c'est précisément par les significations conférées par les actions humaines effectuées dans l'espace que ce dernier devient un lieu. Pour Relph (1976) le lieu est une instance unique (localisée dans l'espace) d'un ensemble composé d'éléments physiques, d'activités observables et de significations humaines. Je pense que le lieu pourrait précisément être défini, de façon opérationnelle, en considérant de façon conjointe son affordance spatiale et son régime d'habiter (Figure 3.11). La prise en compte conjointe des éléments physiques avec les activités observables est fondamentale pour l'affordance spatiale : pour suggérer des fonctionnalités, un lieu doit montrer comment ses fonctionnalités sont à présent exploitées par les usagers (Jordan et al.

1998). Des trottoirs pleins de piétons et de chalands suggèrent des utilisations potentielles différentes qu'un trottoir désert au bord d'un parking, comme déjà remarqué par Jacobs (1961). Les régimes d'habiter sont en revanche définis par les activités et les caractéristiques de ses habitants (y compris en termes d'appartenance à des groupes sociodémographiques) et des significations (souvent révélées par des opinions) qu'ils y attribuent.

Clairement, les lieux sont des cellules au sein d'un système de lieux. Une aire métropolitaine est un système de lieux interconnectés et diversifiés, permettant des modes d'habiter qui combinent différemment les affordances spatiales des lieux qui la composent. Cela impose une subtile distinction sur la question des activités observables. L'affordance spatiale d'un lieu est façonnée par les activités observables de tous ses usagers : résidents, usagers métropolitains, touristes, etc. La vie urbaine intense et diversifiée d'un centre-ville n'est pas seulement le fait de ses résidents. En même temps, pour appréhender le régime d'habiter d'un quartier ou d'un secteur métropolitain, nous devons inclure les pratiques spatiales de ses habitants, qui peuvent se déployer sur l'ensemble de l'aire métropolitaine. Un régime d'habiter de navetteur périurbain, par exemple, n'est pas défini seulement par la pratique de dormir la nuit dans un lotissement périurbain, mais par sa combinaison avec des pratiques de navettage vers les lieux d'emploi, les commerces, les loisirs, souvent par une forte mobilité automobile, et par le sens donné à la quiétude résidentielle du lotissement et à l'usage d'un jardin privé, en opposition à l'usage des espaces publics du centre-ville.

L'utilisation du concept de lieu a néanmoins le danger implicite de suggérer que l'unicité des instances ne permet aucune généralisation dans l'espace géographique (chaque lieu est unique). Le but de ma recherche a alors été précisément de dépasser cette impasse. J'ai ainsi essayé, d'un côté, d'éviter un modèle explicatif des régimes d'habiter par le biais de facteurs morphologiques. De l'autre, avec l'hypothèse de l'existence de types différents d'affordance spatiale et de régimes d'habiter au sein d'une aire métropolitaine, j'ai voulu explorer l'existence de catégories de lieux, permettant un minimum de généralisation sur la base des régularités observables.

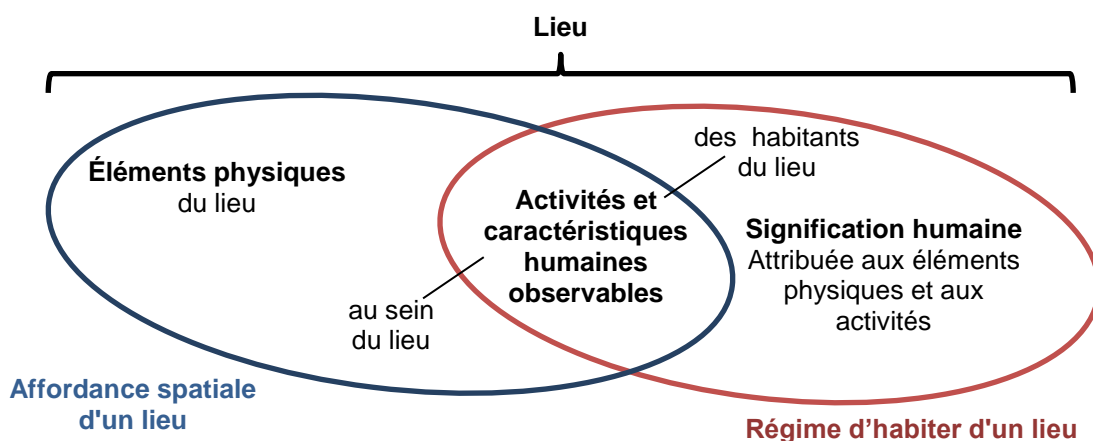


Figure 3.11 - Cadre conceptuel pour le lieu, l'affordance spatiale et le régime d'habiter.

La relation complexe entre affordance spatiale et régimes d'habiter

Le banc d'essai pour cette conceptualisation a été une recherche empirique sur l'aire métropolitaine azurée, définie ici comme l'ensemble du département des Alpes-Maritimes, de la Principauté de Monaco et de l'Est-Var. Cet espace est découpé dans 105 secteurs : les 104 secteurs de

l'enquête ménages-déplacements des Alpes-Maritimes (Conseil Général 06 2009) plus Monaco. L'affordance spatiale des différents lieux de l'aire métropolitaine a été appréhendée par des indicateurs qui peuvent se répartir à la fois en termes d'éléments physiques et activités observables (Figure 3.11), que de caractéristiques intrinsèques (formes bâties, caractéristiques du parc logements, fonctions et spécialisations au sein de chaque unité spatiale) et caractéristiques extrinsèques (position dans l'espace métropolitain de la Riviera, caractéristiques configurationnelles des réseaux viaires, accessibilités), selon le schéma de la Figure 3.8.

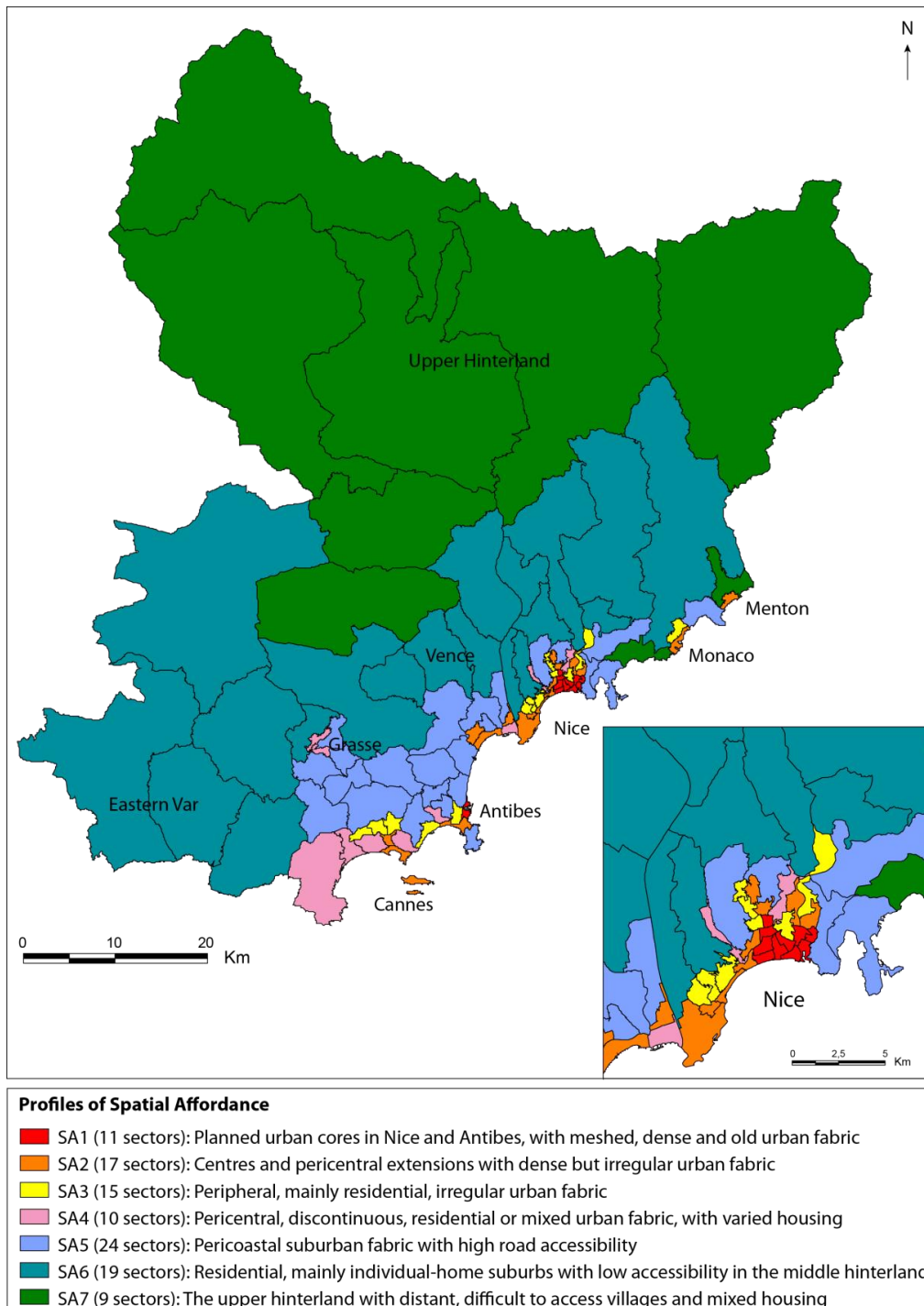


Figure 3.12 - Typologie des affordances spatiales dans l'aire métropolitaine azurienne.

3. Forme et organisation spatiale de la ville complexe

Ensuite, les algorithmes du clustering multivarié bayésien ont été employés pour identifier sept typologies d'affordances spatiales dans l'aire métropolitaine. Projetées dans l'espace, l'appartenance des secteurs aux typologies produit une régionalisation de l'aire métropolitaine (Figure 3.12). Cette régionalisation montre que les espaces littoral et péri-littoral sont une mosaïque de lieux très différents, constituant la section la plus hétérogène de l'aire métropolitaine. Au contraire, presque tout le haut pays alpin est regroupé dans le même profil d'affordance spatiale, tout comme le moyen pays (à l'exception de sa frange sud). Un profil de secteurs résidentiels, avec des tissus périurbains et une grande accessibilité automobile, est fortement présente dans l'aire métropolitaine, particulièrement à l'ouest.

Finalement, un double gradient d'affordances spatiales typiquement urbaines caractérise les séquences SA1-SA2-SA3 et SA1-SA2-SA4, avec une diminution graduelle de la densité et de la régularité des tissus urbains, de la centralité et du mix fonctionnel (dans la première séquence), et de la densité et régularité des tissus urbains ainsi que des caractéristiques des formes bâties (dans la seconde). Globalement, plus on s'éloigne du bord de mer et plus la situation par rapport au littoral joue un rôle dans la caractérisation de l'affordance spatiale métropolitaine. Plus proche du littoral, c'est la distance aux centres-villes et aux autoroutes à être déterminant. La même régionalisation sera-t-elle observable pour les régimes d'habiter ?

Une analyse analogue a ainsi été conduite pour les régimes d'habiter. Ces derniers ont été appréhendés par quelques descripteurs sociodémographiques des habitants ainsi que par des indicateurs de leurs comportements (mobilités et pratiques spatiales, en semaine et pendant les weekends), de leurs mobilités résidentielles et de motivations afférentes, des pratiques de consommation et des niveaux d'équipement et, finalement, des opinions sur la vie de la cité et la mobilité dans l'espace métropolitain.

Même pour les régimes d'habiter, le clustering multivarié bayésien a identifié sept typologies dans l'aire métropolitaine mais la régionalisation qu'ils induisent (Figure 3.13) n'est pas exactement la même que celle des affordances spatiales. Globalement cette régionalisation montre une certaine homogénéité des régimes d'habiter très liés à la proximité des aménités environnementales dans les secteurs métropolitains plus périphériques, notamment dans le haut-pays alpin et dans l'Est-Var. Le littoral est marqué à la fois par les régimes d'habiter urbains, faits de mobilité de proximité, de pratique des espaces publics centraux et de mixité sociale, mais également par le régime d'habiter des ménages aisés relativement poly-topiques. Le moyen pays et l'espace péri-littoral sont finalement segmentés par différents régimes d'habiter. Ces derniers sont en général caractérisés par des styles de vie périurbains, des forts niveaux de mobilité (plus ou moins contrainte) et par la prépondérance de l'usage de la voiture (parfois prenant la forme de dépendance automobile), plus ou moins bien acceptée et vécue avec. Cette segmentation, avec quelques exceptions, marque une forte opposition ouest/est au sein de la métropole.

La comparaison des deux régionalisations montre parfois une stricte correspondance, parfois seulement des recouvrements partiels ou des correspondances multiples entre l'affordance spatiale et le régime d'habiter des secteurs métropolitains. Néanmoins, toutes les combinaisons d'affordance spatiale et de régime d'habiter ne semblent pas possibles. Les correspondances, même lorsqu'elles sont complètes, ne peuvent pas être interprétées en tant que liens de cause à effet, car la relation entre affordance spatiale et régime d'habiter est beaucoup plus complexe. C'est une relation qui se forme sur plusieurs décennies et si, à première vue, les facteurs de l'affordance peuvent influencer les modes d'habiter, à plus long terme, le régime d'habiter d'une population contribue à modifier l'affordance spatiale de son espace de vie : les types architecturaux, l'offre de logements, les liaisons routières et

en transports en commun sont le fruit de choix politiques et de mécanismes de marchés qui, les uns et les autres, prennent en compte les modes d'habiter établis. De surcroît, comme la même affordance spatiale peut correspondre à différents régimes d'habiter, nous devons rejeter tout déterminisme de l'affordance spatiale sur le régime d'habiter, une approche possibiliste ou probabiliste étant beaucoup plus appropriée.

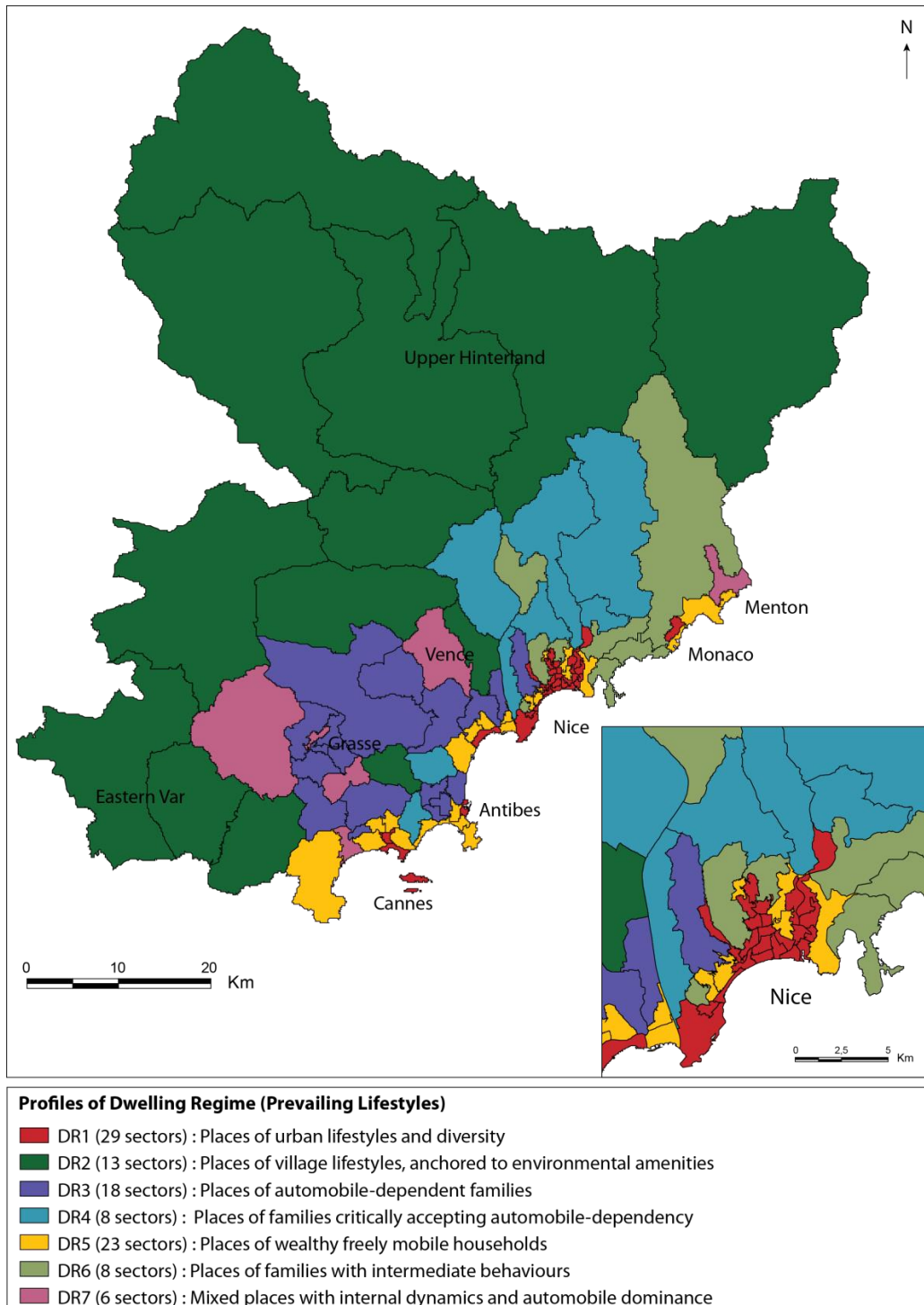


Figure 3.13 - Typologie des régimes d'habiter dans l'aire métropolitaine azurienne.

3. Forme et organisation spatiale de la ville complexe

J'ai ainsi cherché des catégories de lieux par l'identification d'associations régulières entre types d'affordance spatiale et de régime d'habiter. J'ai utilisé la régularité statistique comme indicateur de « congruence » au sens d'Offner (1993) dans son étude sur la relation entre infrastructures de transport et développement territorial : il n'y a pas de simple cause à effet entre phénomène mais complémentarité et convergence dans un fonctionnement systémique plus complexe.

Il devient ainsi intéressant d'utiliser les réseaux bayésiens (voir Sections 4.3 et 4.4) pour explorer les probabilités d'association entre profils. La première question de notre analyse est d'identifier les régimes d'habiter qui ont la plus grande probabilité d'être associés à chaque type d'affordance spatiale. Répondre à cette question permet de comprendre la capacité d'un type d'affordance spatiale à être congruent avec un sous-ensemble de régimes d'habiter. Les réseaux bayésiens permettent de répondre à cette question par le biais de la distribution de probabilité *a posteriori* des régimes d'habiter lorsque l'on rentre un type d'affordance spatiale donnée comme évidence. La seconde question, duale à la précédente, est d'identifier les types d'affordance spatiale congruents avec un régime d'habiter donné. On peut ainsi comprendre, par exemple, l'attraction résidentielle exercée par des lieux à l'affordance spatiale différente, pour les ménages ayant un certain mode d'habiter. Encore une fois, le réseau bayésien fournit une distribution de probabilité *a posteriori* lorsqu'on rentre un régime d'habiter donné comme évidence.

L'analyse croisée de l'affordance spatiale et des régimes d'habiter dans l'aire métropolitaine azurée parvient aux résultats suivants :

- D'abord, l'affordance spatiale des secteurs à plus haute densité, centralité et mixité sociale et fonctionnelle semble avoir une réelle capacité à catalyser des styles de vie urbains dans la population résidente, caractérisés par une moindre mobilité (en distances parcourues) et motorisation et favorisant les alternatives modales à l'automobile. Le profil DR1 correspond avec grande probabilité aux affordances spatiales SA2 et SA1 et, en mesure moindre, au SA3. L'association est parfaite entre SA1 et DR1. L'affordance spatiale des centres et des expansions périphériques aux tissus urbains denses et irréguliers (SA2) est aussi fortement associée aux régimes d'habiter urbains, mais peut être également l'habitat pour des populations moins diversifiées (les ménages aisés à forte mobilité du profil DR5). Le profil SA3 est compatible avec le régime d'habiter urbain DR1, mais ce dernier n'est ni le seul ni le plus probable régime qui lui est associé. Des facteurs d'insatisfaction identifiés au sein des secteurs du régime d'habiter urbain DR1 (insécurité, conditions de logement) pourraient toutefois induire une partie des habitants à déménager dans des zones à l'affordance spatiale moins compatible avec ce style de vie.
- En second lieu, il existe un lien entre les régimes d'habiter à dépendance automobile et les tissus résidentiels périurbains. D'un côté, le régime d'habiter à plus forte dépendance automobile (DR3) a une forte probabilité ($p > 0,6$) de trouver un habitat dans des lieux dont l'affordance spatiale est de type SA5 (périurbain à forte accessibilité automobile), le second habitat le plus probable étant les tissus périurbains du moyen pays (SA6). La dépendance automobile est ainsi vécue de façon relativement positive dans les secteurs plus proches au littoral et au réseau autoroutier, aux bons niveaux d'accessibilité. Elle commence à être questionnée (régime d'habiter DR4) dans les secteurs du moyen pays à moindre accessibilité (affordance spatiale SA6 avec $p = 0,75$). On remarque que les tissus résidentiels périurbains à forte accessibilité près du littoral (profil SA5) sont compatibles avec une grande variété de régimes d'habiter. Si les régimes d'habiter à dépendance automobile (DR3) est le plus probable, d'autres (à l'exception du régime d'habiter urbain DR1) peuvent y être associés, et plus particulièrement celui des ménages aisés et mobiles (DR5).

- En troisième lieu, le régime d'habiter villageois (DR2) trouve son habitat idéal dans le moyen- et haut-pays (profils d'affordance spatiale SA6 et SA7). Dans ces secteurs deux types de tissus urbains se combinent : les vieux villages (prépondérants en SA7) et les lotissements résidentiels (prépondérants en SA6). Ces deux profils ont en commun la présence d'aménités environnementales hautement appréciés au sein du régime d'habiter villageois, mais également les faibles niveaux d'accessibilité, à la fois en voiture et par les transports publics. Exceptionnellement, le régime villageois est compatible avec des secteurs périurbains plus proches du littoral. Il concerne alors des populations plus aisées (rural-métropolitaines), comme dans le secteur de Valbonne qui est l'espace résidentiel de la technopole de Sophia Antipolis. Les secteurs de l'Est-Var ont l'affordance spatiale des tissus résidentiels périurbains avec bonne accessibilité automobile mais sont normalement l'habitat de régimes d'habitat villageois plus périphériques. Si l'on cherche les régimes associés aux affordances spatiales de type SA7 et SA6 avec plus haute probabilité, on trouve que SA7 est presque toujours associé avec le régime d'habiter villageois (à l'exception des secteurs littoraux, associé aux régimes plus mobiles DR7 et DR6). Cela n'est pas vrai pour les tissus résidentiels périurbains du moyen pays (SA6), qui sont compatibles avec une grande diversité de régimes d'habiter, à l'exception du plus typiquement urbain (DR1). Cette diversité montre que les régimes de la forte dépendance automobile (DR3, DR4) ne sont pas le seul mode d'habiter possibles dans le moyen-pays azuréen.
- Finalement, une des principales spécificités de la métropole azurée est l'existence de secteurs avec une prépondérance de ménages aisés aux pratiques spatiales poly-topiques (profil DR5). Les types d'affordance spatiale compatibles avec ce mode d'habiter sont nombreux (SA3, SA2, SA4 et SA5) mais ont tous quelques caractéristiques communes. Les trois premiers sont relativement denses et proches des centres métropolitains, bénéficiant de très bons niveaux d'accessibilité automobile, en transports en commun, et piétonne. La prépondérance de l'utilisation de l'automobile y pourrait être contrecarrée par l'augmentation de la mixité sociale, en accueillant des populations plus prêtes à utiliser les transports en commun, la marche ou le vélo (étudiants, ménages à faibles revenus). Lorsqu'ils sont associés au régime DR5, les tissus urbains péri-littoraux (SA5) sont plutôt des secteurs de bord de mer très convoités avec des grandes villas. En invertissant l'analyse, l'affordance spatiale de type SA3 et SA4 est compatible avec divers régimes d'habiter. Le premier est associé avec les populations aisées et mobiles (DR5, $p = 0,5$) et avec le régime d'habiter urbain (DR1, $p = 0,3$). Le second peut être l'habitat des populations aisées et mobiles (DR5, $p = 0,5$), pour les populations mixtes avec dynamiques locales et dominance automobile (DR7, $p = 0,2$) et de familles à dépendance automobile (DR3, $p = 0,2$).

Globalement, **cette recherche montre qu'il est possible de généraliser des catégories de lieux d'une aire métropolitaine, sur la base de profils d'affordance spatiale et de régimes d'habiter et de relations probabilistes entre les deux.** Les réseaux bayésiens fournissent les généralisations recherchées, mais permettent des exceptions, qui permettent d'identifier quelques lieux particuliers et uniques, dont les spécificités seront mieux comprises dans le contexte des généralisations produites. Plus en général, la segmentation par les réseaux bayésiens permet d'identifier des archétypes de lieu à partir de données empiriques. Il s'agit d'une démarche mixant théorie et apprentissage des données qui trouve un écho dans l'heuristique de recherche des idéo-types proposée par Max Weber (1922). **L'approche probabiliste des réseaux bayésiens permet en particulier de mieux appréhender le caractère imparfait des relations entre les affordances spatiales et les régimes d'habiter et d'utiliser l'incertitude des conclusions pour identifier tant les cas les plus typiques que les exceptions** (voir Section 4.4).

Je dois également souligner les quelques limites de cette recherche. La première faiblesse de l'application est l'utilisation du découpage grossier en 105 secteurs, imposé par les données de l'enquête ménages-déplacements des Alpes-Maritimes, et cela pour plusieurs raisons. D'abord leur faible nombre peut produire du sur-apprentissage dans des typologies avec un très faible nombre d'unités spatiales. Ensuite, les indicateurs morphologiques calculés contiennent du bruit lorsqu'ils sont définis sur un découpage administratif et, encore plus, ils masquent l'hétérogénéité d'affordance spatiale pouvant exister dans des unités spatiales très vastes, comme celles du moyen- et du haut-pays. La méthode MFA aurait pu éliminer ces biais, mais n'était pas encore mise au point au temps de cette recherche. Finalement, utiliser des périmètres administratifs n'est jamais judicieux dans la recherche des « lieux » d'une métropole, qui devraient être délimités de façon plus inductive à partir des données, objectives et subjectives, venant du terrain. Il s'agissait, dans cette recherche, du prix à payer pour disposer de données statistiquement significatives pour les mobilités, les pratiques et les opinions des ménages. La description de l'affordance spatiale devrait également être enrichie par des enquêtes spécifiques explorant la cognition de l'espace métropolitain et de ses caractéristiques par les habitants. Les caractéristiques spatiales perçues et celles objectivement mesurées pourraient ainsi être croisées. C'est une direction de recherche déjà poursuivie par la psychologie environnementale et notamment employée par la sociologie des transports dans l'étude des pratiques modales des citoyens (Kaufmann 2000).

Les résultats trouvés dans la métropole azurienne sont strictement liés aux données de ce terrain et suggèrent des comparaisons avec d'autres aires métropolitaines pour pouvoir généraliser les relations existantes entre affordance spatiale et régimes d'habiter. Ce qui est généralisable est le plan de recherche suivi. Ceci n'est pas purement inductif : des concepts, complexes et aux multiples facettes, ont été définis avec des présupposés théoriques et des indicateurs ont été ensuite recherchés pour appréhender les différents aspects de ces concepts. À vrai dire, la conceptualisation sous-tendant les indicateurs contribue à la robustesse des analyses. En ce qui concerne les concepts, **la recherche a confirmé le besoin d'élargir l'approche à la relation entre la forme physique de la ville et les comportements de mobilité des habitants.** Ces deux termes doivent être compris au sein de concepts plus englobants : celui de l'affordance spatiale d'un lieu (combinant caractéristiques physiques et activités perçues, ainsi que les propriétés spatiales intrinsèques et extrinsèques) et celui de son régime d'habiter (style de vie prépondérant parmi ses habitants, saisi dans sa dimension géographique et intégrant la perception sociale des espaces). Ces deux concepts participent à la définition des lieux d'une aire métropolitaine, dans la mesure où l'affordance spatiale et les régimes d'habiter prennent également en compte la spatialité métropolitaine (centralité et position des lieux, pratiques spatiales des habitants au sein de l'aire métropolitaine, etc.). **Différentes questions soulevées dans les politiques de durabilité urbaine** (comme la dépendance automobile, l'étalement urbain, l'hyper- et l'hypo-mobilité, etc.) **peuvent alors être saisies comme facettes d'une relation plus complexe entre affordance spatiale et régimes d'habiter qui se combinent différemment au sein d'une aire métropolitaine.** Cette relation est l'issue d'une auto-organisation qui s'est produite sur plusieurs décennies et ne peut pas être réduite à une causalité simple. Les politiques visant à favoriser ou contrecarrer certains phénomènes (de la densification urbaine à la dépendance automobile) devraient tenir compte de la complexité de cette relation qui façonne les lieux. Intervenir sur certains aspects seulement de l'offre de transport ou de la forme physique pourrait ainsi produire la mobilité résidentielle des ménages plus que le changement de leurs comportements de mobilité si leurs modes d'habiter ne sont pas compris et intégrés dans les politiques.

Le commerce, un domaine privilégié pour l'analyse forme/fonctionnement

Une troisième recherche, conduite dans le cadre du programme PREDIT (Fusco et Genre-Grandpierre 2015, Fusco et al. 2015), a ciblé spécifiquement la relation entre forme et fonctionnements urbains en appréhendant la première en termes de configuration et en se focalisant sur les activités commerciales en ce qui concerne les seconds. Le principal objectif de la recherche était de **comprendre les caractéristiques morphologiques des réseaux routiers** (permettant donc la mobilité automobile) **et des réseaux viaires** (permettant le mouvement piéton) **qui constituent des facteurs positifs ou négatifs pour le développement de l'offre commerciale dans la ville**, et notamment celle des petites et des moyennes surfaces.

Dans un second temps, la recherche a essayé de comprendre, par une démarche de stress test, quels effets pourraient avoir les modifications des réseaux actuels sur le potentiel commercial des différents quartiers. L'objectif opérationnel était d'identifier les moyens pour parvenir à une plus large diffusion du potentiel commercial dans l'espace urbain. Une répartition plus homogène du commerce dans la ville est en effet un élément essentiel à l'animation de l'espace public et donc à l'urbanité des différents quartiers, mais également un moyen pour atteindre une véritable ville des courtes distances où l'accessibilité sera finalement découplée de la forte mobilité automobile.

Les dynamiques commerciales sont très sensibles aux changements des formes urbaines et de leurs réseaux et peuvent même être considérées comme des précurseurs d'autres dynamiques dans la localisation des activités urbaines. Dès lors, le commerce devient un domaine privilégié pour l'analyse de la relation forme/fonctionnement dans les espaces urbains. Les modèles urbains de type LUTI (Wegener 2004, Batty et al. 2013) réduisent cette relation au rôle des niveaux d'accessibilité routière à la clientèle et de l'éloignement avec la concurrence. Cela est probablement vrai pour les grandes surfaces commerciales, pouvant drainer une vaste clientèle motorisée par d'importants moyens publicitaires, à condition de bénéficier d'une bonne accessibilité routière et d'une faible concurrence directe. J'ai personnellement conduit avec S. Bauer des recherches sur les stratégies de localisation de la chaîne d'ameublement IKEA dans les agglomérations françaises et allemandes (Bauer et Fusco 2016), montrant précisément cette logique spatiale dans les choix d'implantation. Les grandes surfaces ont par ailleurs la possibilité de négocier la modification des réseaux de desserte avec les collectivités locales, lors de leur implantation.

Mais pour les commerces traditionnels et les moyennes surfaces, le lien avec les formes urbaines est plus subtil, et ces acteurs du commerce n'ont pas la possibilité de négocier directement la modification des réseaux. Ainsi, le développement de la motorisation des ménages et des réseaux routiers a conduit depuis plus de 40 ans à de fortes concentrations commerciales en périphérie des villes (Wiel 1999, Boquet et Desse 2010), avec pour conséquence des pratiques commerciales peu durables, car dépendantes de l'usage de la voiture sur des distances relativement longues (les mobilités commerciales pèsent fortement aujourd'hui dans le total des mobilités urbaines). Les petits commerces semblent plus étroitement liés à la présence de parcours piétons. Pourtant, que ça soit dans les cités de logements sociaux, dans les villes nouvelles ou dans les lotissements périurbains, souvent pourvus de cheminements piétons, les commerces se développent à peine (voir ils reculent) dans les locaux qui leur avaient été alloués. Le rapport concurrentiel avec l'offre commerciale des grandes surfaces y est pour quelque-chose, mais il n'explique pas tout. Pour preuve, le commerce traditionnel résiste relativement bien dans d'autres espaces urbains, notamment dans les centres-villes aux morphologies plus traditionnelles. Or, les réseaux de cheminements desservant les cités, les villes nouvelles et les lotissements, ont-ils la même forme que ceux des villes traditionnelles ? Et si différence y est, en quoi consiste-t-elle ? À quelle échelle est-elle observable ? Dans ce contexte

général, ici caricaturé à grands traits, l'objectif est de voir quelle est l'influence des réseaux routier (pour le mouvement automobile) et viaire (pour le mouvement piéton) sur les localisations commerciales, en particulier des petites et moyennes surfaces, en vue d'élaborer des recommandations pour l'urbaniste dans le but de promouvoir des localisations commerciales plus durables.

Le terrain de cette recherche est l'agglomération de Nice (Alpes-Maritimes). Il s'agit de la principale agglomération urbaine de l'aire métropolitaine azurée, avec un demi-million d'habitants et 22 300 petites et moyennes surfaces commerciales, en sus des 37 grandes surfaces, dans les villes littorales de Nice, Saint-Laurent-du-Var et Cagnes-sur-Mer et dans une vingtaine de communes environnantes. Cette agglomération a été à la fois un des pionniers dans le développement de nouvelles formes d'offre commerciales (le premier centre commercial de France, Cap 3000, ouvert ici en 1969) et dispose encore d'une offre commerciale traditionnelle très étoffée, même si différemment répartie dans l'espace urbain.

Les observations qualitatives et les intuitions de J. Jacobs dans son travail fondateur sur les grandes villes américaines (Jacobs 1961) suggéraient déjà que les petites et moyennes surfaces commerciales dépendent directement de la capacité du système morphologique à catalyser localement le passage et la rencontre des chalands. Hillier (1996) fournit un cadrage théorique plus cohérent à ces observations par la formulation de principes, notamment configurationnels, pouvant rattacher l'économie urbaine au mouvement potentiel structuré par ses espaces publics. L'approche de la syntaxe spatiale était ensuite proposée pour opérationnaliser des analyses permettant de vérifier ces principes. Nous savons en tous cas (Section 3.4) que la syntaxe spatiale n'est pas la seule méthode possible d'analyse configurationnelle.

Des nombreuses études ont ainsi été développées pour chercher à vérifier, qualifier et quantifier le rôle des propriétés configurationnelles dans la localisation des activités commerciales, en mobilisant tantôt la syntaxe spatiale (Van Nes 2005, Ortiz-Chao et Hillier 2007, Chiaradia et al. 2009, Cutini 2001, Srirangam et Forsyth 2012, Omer and Goldblatt 2015), tantôt des approches primales comme l'analyse de centralité multiple (Porta et al. 2009, 2012, Sevtsuk 2010, Wang et al. 2014).

Un modèle bayésien pour lier les densités commerciales aux propriétés configurationnelles

Notre recherche se nourrit des indications déjà fournies par ces nombreuses études et apporte un certain nombre d'innovations méthodologiques, notamment dans le développement d'approches réticulaires et dans la caractérisation des incertitudes affectant la connaissance de la relation forme/fonctionnement. Elle adopte le plan de recherche montré dans la Figure 3.14.

L'approche à la forme urbaine est celle configurationnelle de l'analyse de centralité multiple (MCA, Porta et al. 2006, Sevtsuk et Mekonnen 2012). Nous calculons d'abord les propriétés configurationnelles des rues, liées aux relations qu'elles entretiennent avec toutes les autres rues dans un périmètre donné, par le biais des chemins minimaux reliant les bâtiments et suivant la connexité du réseau. En prenant en compte la localisation des bâtiments, nous enrichissons l'approche proprement configurationnelle (qui s'effectue sur les seuls réseaux urbains) par l'intégration d'une autre composante importante du système morphologique urbain : le bâti. Le MCA propose un riche ensemble de paramètres configurationnels : l'atteignabilité, la proximité, l'intermédiarité, l'atteignabilité rectilinéaire. Ces trois derniers paramètres peuvent être normalisés par l'atteignabilité pour obtenir de nouveaux indicateurs (l'éloignement moyen, l'intermédiarité relative, la rectilinéarité moyenne des parcours piétons, l'efficacité des réseaux routiers). Nous avons calculé ces indicateurs

pour tous les 88 700 segments viaires de l'agglomération, à différentes échelles : micro- (300 m), méso- (1200 m) et macro-échelle (5000 m) pour le mouvement piéton, méso- (5 min) et macro-échelle (20 min) pour le mouvement automobile.

La localisation des 22 300 petites et moyennes surfaces commerciales (de moins de 2000 m² de surface de vente) a en revanche été utilisée pour calculer une densité commerciale de kernel pour chaque segment viaire, en utilisant l'estimation discontinue aux nœuds proposée par Okabe (Okabe et Sugihara 2012). L'influence des grandes surfaces commerciales a été explorée également en dépassant la théorie du mouvement naturel de l'analyse configurationnelle. On a ainsi fait l'hypothèse que la présence d'une grande surface commerciale, au sein d'une configuration de rues, peut donner lieu à des flux ayant comme destination précise la grande surface commerciale. Ces flux, toujours façonnés par la configuration, sont susceptibles de créer des opportunités commerciales pour les petites et moyennes surfaces.

Nous recherchons ensuite quelles règles lient les propriétés configurationnelles calculées aux densités commerciales empiriques. L'objectif est de comprendre quels paramètres configurationnels sont les plus déterminant dans l'explication des distributions observées des petites et moyennes surfaces et quels niveaux d'incertitude peuvent affecter les relations ainsi trouvées. Des caractéristiques spatiales intrinsèques des rues (largeur, type, nature du revêtement, vitesse de circulation consentie, etc.) ont également été intégrées dans les possibles facteurs explicatifs des densités commerciales, à côté des propriétés configurationnelles (caractéristiques extrinsèques au sens du schéma dans la Figure 3.8).

L'impact des paramètres configurationnels sur les densités commerciales a été investigué par des réseaux bayésiens, pour leur capacité à détecter des relations linéaires, non-linéaires ou même non fonctionnelles dans un contexte de connaissance incertaine, parmi un grand nombre de facteurs explicatifs possibles (voir Section 4.4). Ces avantages de la modélisation par les réseaux bayésiens se payent en termes de moindre précision par rapport aux modèles régressifs plus classiques. Le modèle recherché est ainsi un modèle relativement grossier des segments viaires en cinq grandes classes de densités commerciales, facilement interprétables :

1. Les segments sans commerce et sans influence de commerces à proximité ;
2. Les segments sans commerce mais sous influence de commerces proches ;
3. Les segments avec un seul commerce ;
4. Les segments avec plusieurs commerces ;
5. Les segments à forte présence commerciale (plus de six équivalents petits commerces).

Plusieurs paramétrisations de la recherche inductive du meilleur modèle explicatif ont donné lieu à des modèles légèrement différents, mais concordant sur les faits suivants : plus de deux tiers des classes de densité commerciale (entre 66% et 70% selon le modèle) peuvent être expliqués par une combinaison de l'accessibilité piétonne de micro-échelle (proximité, atteignabilité ou atteignabilité rectilinéaire), de performance du réseau routier à la méso-échelle et de paramètres d'intermédiarité de méso-échelle (viaire, routière ou par rapport aux grandes surfaces commerciales, selon le modèle). Les paramètres probabilistes permettent de quantifier les règles d'association ainsi trouvées entre paramètres configurationnels et densités commerciales.

Une fois ces règles extraites, une application informatique a été créée de façon à modifier les réseaux routier et viaire en fonction de règles topologiques (par exemple l'augmentation de la connectivité ou, au contraire, la limitation de la taille des mailles). Ces modifications topologiques sont réalisées afin d'augmenter le potentiel pour l'implantation de commerces de façon à limiter leur

3. Forme et organisation spatiale de la ville complexe

concentration. L'approche permet donc l'aide à la décision en urbanisme commercial, en focalisant sur le rôle déterminant de la structure des réseaux viaire et routier. Des scénarios d'évolution des réseaux ont alors permis d'explorer les impacts les plus probables sur le tissu commercial. Les opérations visant à mieux mailler l'espace urbain et à augmenter sa connectivité, peuvent augmenter considérablement le potentiel commercial de la voirie de l'aire d'étude. A contrario, la dé-densification du maillage et sa réduction à une grande arborescence risquent de faire disparaître une bonne partie du potentiel commercial actuel.

Un important apport de cette recherche a été la mise au point d'une nouvelle méthodologie pour étudier la relation entre localisations commerciales et morphologie urbaine. Elle intègre une approche rigoureusement réticulaire (suivant Okabe et Sugihara 2012) à l'analyse de la configuration de la voirie et à la localisation des commerces et une modélisation probabiliste par l'approche des réseaux bayésiens (voir Section 4.4). L'approche de l'analyse de centralité multiple, déjà proposée par les travaux de S. Porta sur les villes de Bologne (Porta et al. 2009) et de Barcelone (Porta et al. 2012), a ainsi été ultérieurement développée par des procédures d'interpolation réticulaire et par une recherche de règles liant la position du segment de rue dans l'espace urbain au potentiel commercial du segment de rue.

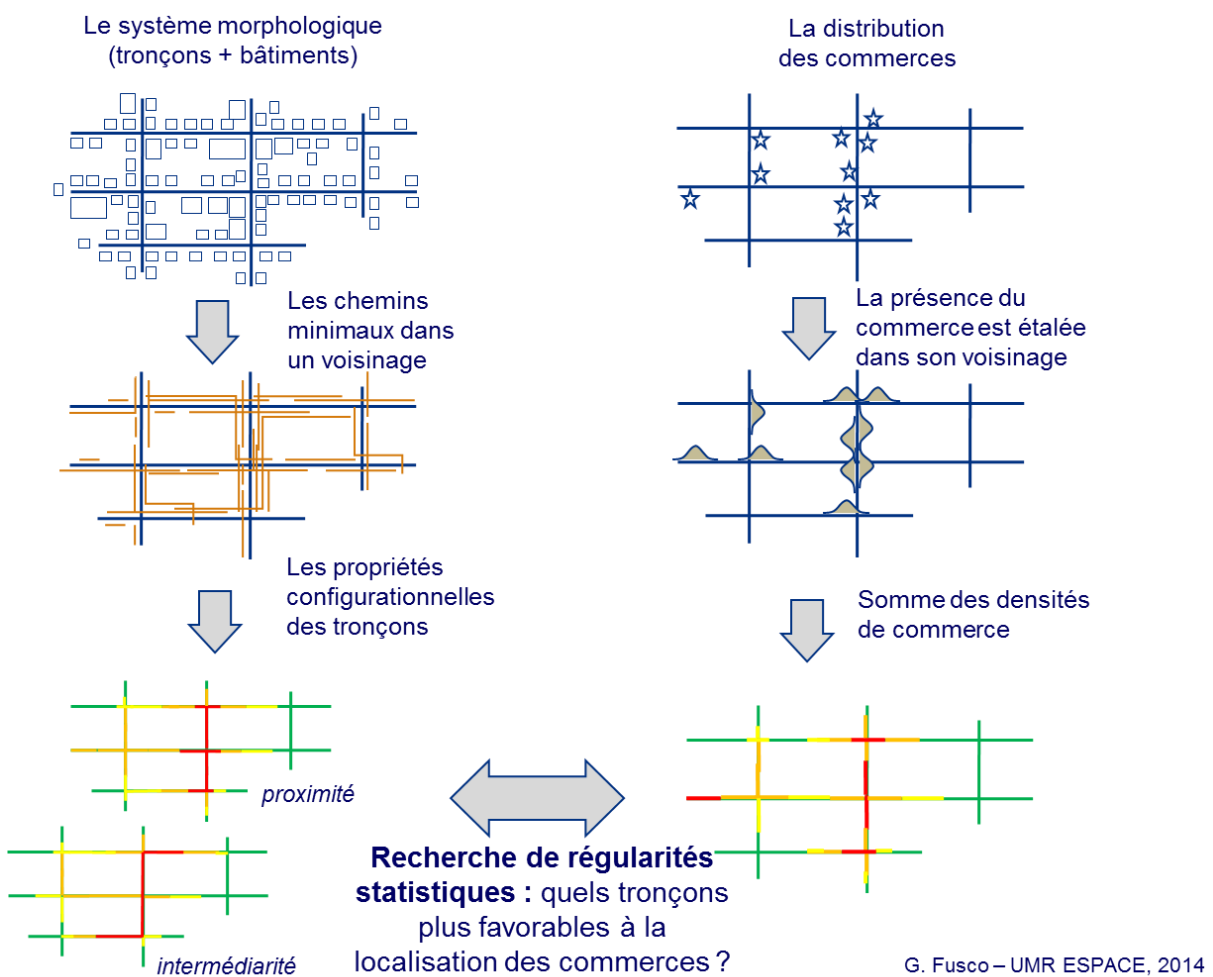


Figure 3.14 – Plan de recherche pour l'analyse de la relation entre forme urbaine et commerce.

Nos résultats montrent que **la relation entre morphologie des réseaux et localisation des commerces dans l'agglomération de Nice concerne plusieurs échelles, les effets combinés des logiques piétonnes et automobiles ainsi que les effets de la présence des grandes surfaces commerciales**. Appliquée au cas d'étude de l'agglomération niçoise, l'analyse a permis d'identifier la meilleure capacité du réseau maillé traditionnel à catalyser l'activité commerciale. **Ces résultats dépassent les précédentes recherches conduites par l'approche MCA** (Porta et al. 2009, 2012, Sevtsuk 2010, Wang et al. 2014) **par leur nature entièrement réticulaire, par l'intégration des logiques piétonnes et automobiles et par le cadre causal probabiliste employé dans la modélisation des relations**. Le croisement des logiques piétonnes et automobiles a même montrée le potentiel de l'approche MCA à pleinement intégrer les impédances spatiales au mouvement dans des réseaux qui ont une topographie et pas seulement une topologie. Il s'agit, de ce point de vue, d'un avantage par rapport à la modélisation duale de la syntaxe spatiale.

Nos résultats convergent en revanche avec ceux des recherches conduites par S. Porta sur Bologne et sur Barcelone en identifiant l'impact de **la dualité morphologique des villes européennes contemporaines sur les activités commerciales** : les espaces plus anciennement agglomérés, à forte connectivité, offrent une plus grande richesse de rues à fort potentiel commercial, les espaces les plus récents (quartiers modernes ou espace périurbain), moins connectifs et relativement arborescent, concentrent le potentiel commercial dans un nombre très limité de rues. La présence de grandes surfaces commerciales peut localement modifier les stratégies de localisation des autres commerces, mais ces effets aussi doivent être compris au sein des configurations des réseaux. Or à Nice, comme dans beaucoup d'autres agglomérations européennes, les réseaux viaires et routiers sont en train d'évoluer vers des formes plus arborescentes et moins connectées. C'est notamment le cas dans les espaces d'expansion périurbaine, mais également au sein des tissus urbains plus traditionnels par la privatisation et la fermeture de nombreuses rues, comme attesté par Dorier et al. (2012) dans le cas de Marseille. Réorienter ces tendances pour augmenter la connectivité et le maillage des réseaux ouverts au public est un grand défi pour l'urbanisme des prochaines décennies.

Les scénarios de modification des réseaux se basent sur des hypothèses un peu simplistes sur la faisabilité technique et politique de certaines options, leur but étant seulement d'explorer l'ensemble des mesures possibles. Cependant, ils ont le mérite de montrer aux urbanistes qu'il est possible de concevoir des stratégies d'urbanisme commercial axées sur la modification du réseau de voirie. En intervenant sur la forme du réseau (et éventuellement sur ses vitesses), il est possible de créer ou de détruire les conditions de réussite de l'activité commerciale. La compréhension de la relation forme/fonctionnement permet alors d'accompagner des politiques visant à créer le potentiel d'un renouveau commercial dans les quartiers périphériques, qui aujourd'hui pâttissent d'un véritable délitement de leur tissu commercial.

Convergence de registres de la forme et pluralité de modèles urbains pour l'analyse du commerce

La recherche conduite permet d'ouvrir des perspectives d'avancement dans la compréhension de la relation entre forme urbaine et fonctionnements commerciaux. Dans la Section 4.4 je présenterai de façon plus détaillée la prise en compte des incertitudes probabilistes attribuées à la relation entre paramètres configurationnels et densités commerciales. L'existence de plusieurs modèles possibles devrait également être intégrée dans l'incertitude qui affecte notre connaissance de cette relation.

Les modèles ici présentés peuvent clairement être améliorés par une meilleure prise en compte des spécificités du mouvement piéton et automobile dans l'espace urbain : les lignes de transports en commun en site propre (métro, tramway) pourraient ainsi être introduites comme accélératrices du

mouvement piéton, tout en rajoutant la spécificité de leur spatialité (importance des nœuds d'arrêt, configuration réticulaire en présence de plusieurs lignes, etc.); l'offre de stationnement est en revanche à intégrer à la modélisation du mouvement automobile, constituant à la fois une opportunité et une contrainte pour la localisation des commerces. Une autre option consiste à mieux tirer profit de la dualité morphologique des villes européennes : des modèles différents pourraient être développés pour la ville traditionnelle maillée et connective et pour la ville plus arborescente et à faible connectivité des dernières décennies. On se rapprocherait ainsi davantage à l'hypothèse d'homogénéité de l'espace assumée par Sevtsuk (2010).

La complexité de la relation étudiée pourrait aussi être augmentée par la prise en compte des interactions entre les différentes activités commerciales. Jensen (2006), Hidalgo et Castañer (2015) analysent ainsi l'attraction/répulsion entre les différentes catégories de commerce. Une composante autorégressive pourrait également être introduite à la modélisation des densités commerciales (Sevtsuk 2010) : la configuration crée le potentiel pour le commerce mais, une fois les commerces installés, les flux qu'ils attirent se somment à ceux liés à la configuration, créant des nouvelles opportunités commerciales. La dimension diachronique est une autre perspective de recherche, permettant de suivre la réelle dynamique des arrivées et des départs des commerces sur le bord de chaque segment viaire, compte tenu de la distribution des autres commerces à chaque instant. Ces deux directions de recherche viendraient compléter les approches configurationnelles, permettant de rajouter à la structuration de l'espace par la configuration les éventuelles « déformations » de l'espace par la localisation des fonctions commerciales, parvenant ainsi à une évaluation plus complète de la relation forme/fonctionnement.

Finalement, la configuration des réseaux viaires n'est qu'un registre de la forme de la ville. Son étude en vue de comprendre la morphologie fonctionnelle du commerce est une manière de mettre à système deux différents registres de la forme en suivant une indication particulièrement présente dans la littérature : la configuration structure le mouvement potentiel et ce dernier crée des opportunités pour le commerce. Mais d'autres aspects de la forme physique de la ville peuvent être pris en compte : les formes des tissus urbains, par exemple, fournissent une caractérisation beaucoup plus riche du contexte morphologique des activités commerciales et peuvent à leur tour être enrichies par les formes du paysage urbain perçues par le chaland (vision du piéton, ambiances) ou socialement codifiées par une population (perception sociale des espaces). Le commerce se localise ainsi par rapport au mouvement, mais il est attentif également à d'autres aspects du contexte spatial dans lequel il se situe. L'approche MFA (voir Section 3.2) pourrait ainsi être une première étape pour enrichir la description configurationnelle avec celle des tissus perceptibles par le piéton. Même le développement de modèles pour des sous-espaces urbains différents pourrait se révéler plus articulé que le simple dualisme entre configurations arborescents et configurations connectives et se baser davantage sur les régions morphologiques que seule une analyse des tissus peut identifier.

Travaux personnels cités dans le chapitre

Araldi A., Fusco G. (2017) Decomposing and Recomposing Urban Fabric: The City from the Pedestrian Point of View. In G. Borruo et al. (eds.) *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2017, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 10407, Springer, 365-376.

Bauer S., Fusco G. (2016) Indikatoren-gestützte Analyse der Einflussnahme von Investoren auf die kommunale Planung am Beispiel der stadtplanerischen Standorteignung. *Flächenmanagement und Bodenordnung (FUB)*, 2/2016, 79-85.

Donzel A., Faure L., Fusco G., Girard A., Le Dantec E., Scarella F. (2011) *Enquête sur l'accession à la propriété résidentielle dans les régions méditerranéennes françaises*. Rapport de recherche pour la DREAL PACA, programme OTM, UMR LAMES / UMR ESPACE / UPVD, Marseille.

Fusco G. (2004) *Un modèle systémique d'indicateurs pour la durabilité de la mobilité urbaine : les cas de Nice et Gênes dans une comparaison internationale*. 2 volumes + CD-ROM, Chambre de Commerce Italienne de Nice / Université de Nice Sophia Antipolis / Politecnico di Milano, Nice.

Fusco G. (2016) Beyond the Built-up Form / Mobility Relationship: Spatial Affordance and Lifestyles. *Computer Environment and Urban Systems*, 60, 50-66.

Fusco G., Araldi A. (2017a) The Nine Forms of the French Riviera: Classifying Urban Fabrics from the Pedestrian Perspective. *ISUF 2017 XXIV International Conference Proceedings*, pp. (in press)

Fusco G., Araldi A. (2017b) Significant Patterns in Urban Form Spatial Analysis of Morphological Indicators. *Revue Internationale de Géomatique*, 4/2017, (pagination en cours).

Fusco G., Cagliioni M., Araldi A. (2015) Street network morphology and retail locations. Application to the city of Nice (France). *ECTQG 2015 Proceedings, Plurimondi*, VIII, 17, 15-22, <http://plurimondi.poliba.it/index.php/Plurimondi/article/view/26/15>

Fusco G., Genre-Grandpierre C. (2015) *DAMA : Vers de nouvelles dynamiques de localisation des ménages et des activités dans les territoires urbains pour découpler accessibilité et mobilité automobile - Rapport Final*. PREDIT 4, GO n° 6, Ministère de l'Équipement, UMR 7300 ESPACE, Avignon, 186 p.

Fusco G., Scarella F. (2012) Looking for socio-geographic profiles from survey data: the case of home ownership in the French Riviera. *Proceedings of the 15th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, Avignon, April 25th-27th 2012, 6 p., http://www.agile-online.org/Conference_Paper/CDs/agile_2012/proceedings/papers

Fusco G., Scarella F. (2014) *Bayesian Clustering of Housing Preferences and Lifestyles: a Comparative Analysis of Home Ownership in South-Eastern France*. UMR ESPACE, halshs-01505436, 31 p.

Fusco G., Tirico M. (2016) Configurational Approaches to Urban Form: Empirical Test on the City of Nice (France). *Proceedings of INPUT 2016*, Torino (Italy), Sept. 14th-16th 2016, http://www.input2016.it/conference_2016/conference_proceedings, p. 376-382.

Groupe Interfaces (2008) L'interface : contribution à l'analyse de l'espace géographique. *L'espace géographique*, 2008/3, p. 193-207.

À retenir

- Géographes et urbanistes ont une légitimité à aborder la complexité structurelle de la ville par l'entrée de sa spatialité. Cette spatialité nourrit les concepts très proches d'organisation spatiale et de forme urbaine. En réalité, une définition large du concept de forme urbaine permet d'identifier une pluralité de registres et de significations associées.
- La morphologie urbaine traditionnelle a produit une connaissance phénoménologique extrêmement importante sur la forme des tissus et des tracés urbains, avec une attention particulière à l'histoire de leur production. Ces connaissances peuvent aujourd'hui être renouvelées par des approches computationnelles comme le *Multiple Fabric Assessment (MFA)*. Appliqué pour la première fois à l'aire métropolitaine azuréenne, ce protocole d'analyse a permis d'identifier ses différents tissus ainsi que la complexité de leur organisation spatiale.
- Celui de la configuration des réseaux viaires est un nouveau registre de la forme urbaine qui, dès le début, a couplé les approches des réseaux complexes avec la géocomputation. L'approche configurationnelle montre que le principe fondateur de l'organisation urbaine n'est pas la distance en soi, quelle que soit sa définition, mais le système de l'ensemble des distances réciproques, c'est-à-dire la configuration. Les propriétés configurationnelles sont émergentes et peuvent fonder des recherches morpho-fonctionnelles.
- Par les théories de la toile urbaine et du champ d'information urbain, N. Salingaros fournit des clés de lecture précieuses pour la complexité structurelle de la forme urbaine. Ses approches ouvrent la perspective d'une analyse morpho-fonctionnelle pleinement informée de la complexité de la ville. Le côté normatif de ses théories, souhaitant guider la production urbanistique et architecturale, limite néanmoins la compréhension du succès des formes urbaines contemporaines. Ces dernières participent à des fonctionnements socioéconomiques et à des nouveaux régimes d'habiter métropolitains. Les caractéristiques objectives des espaces urbains doivent ainsi être mises en relation avec leur représentation sociale, une dimension ultérieure de la complexité de la ville.
- Plusieurs recherches m'ont permis d'explorer et de tester les relations multiples existant entre formes urbaines et fonctionnements humains de la ville. Mon effort a été toujours de rendre opérationnels des concepts théoriques au sein de protocoles d'analyse spatiale. L'identification de profils sociogéographiques et l'opérationnalisation du concept d'affordance spatiale ont permis d'éclairer les relations entre morphologies urbaines et modes d'habiter dans un contexte métropolitain. L'analyse configurationnelle a en revanche permis de vérifier un certain nombre d'hypothèses sur la localisation des activités commerciales, confirmant la meilleure capacité des configurations traditionnelles hautement connectives à accueillir le commerce urbain. Toutes ces recherches confirment la complexité des relations forme-fonctionnement dans la ville et produisent des connaissances relativement incertaines.
- En conclusion, ce chapitre permet d'affirmer que la forme urbaine est complexe à plusieurs titres :

- Elle est un phénomène fortement multidimensionnel, caractérisé par une pluralité d'aspects physiques et fonctionnels, chacun pouvant être formalisé comme un point de vue différent sur un système complexe.
- En approfondissant quelques registres de la forme, nous pouvons montrer sa grande complexité structurelle, en lien avec une multiplicité d'échelles qui donnent lieu à des niveaux d'organisation différents mais imbriqués (les types architecturaux, les tissus urbains, les régions morphologiques, les organismes urbains, les modules morpho-fonctionnels de Salinger et Alexander) et à des propriétés trans-scalaires qui renvoient à des processus d'auto-organisation (l'auto-similarité statistique des lois de puissance, la dualité des réseaux d'avant-plan et d'arrière-plan émergeant des configurations).
- La forme urbaine se caractérise par plusieurs propriétés de la complexité morinienne. D'abord l'hologrammétrie : elle se compose d'éléments de forme qui ont leur propre spatialité et sont à leur tour porteurs de conditionnements pour les assemblages de forme aux niveaux supérieurs. On peut également parler d'hologrammétrie renversée (les formes trouvent leur programme dans les formes environnantes) et de récursivité (suite de générations des éléments de forme aux différentes échelles), avec la particularité des temporalités différenciées entre l'infrastructure morphologique (le site, le réseau viaire, le parcellaire) et sa superstructure (le bâti, les éléments végétaux, les vides).
- L'étude de la relation forme-fonctionnement ne peut pas être réduite à une simple détermination. Il faut parler plutôt de congruence entre phénomènes. De surcroît, la complexité de la forme est également celle de l'imperfection de cette relation. La forme n'est pas optimisée pour un fonctionnement particulier, elle est redondante et son « programme » est ouvert, ce qui lui donne une certaine adaptativité par rapport à la diversité des fonctionnements possibles.

Questions ouvertes

- L'incertitude s'avère omniprésente dans la connaissance que nous pouvons avoir sur la complexité structurelle de la forme urbaine et sur ses liens avec les fonctionnements humains dans la ville. Comment ces incertitudes peuvent être formalisées et évaluées ? Y-at-il des incertitudes encore plus profondes, réfractaires à toute formalisation et évaluation ? Comment les intégrer dans une démarche scientifique ? (Chapitre 4).
- Dans quelle mesure la compréhension de la complexité structurelle du système morphologique urbain et de ses relations multiples avec les fonctionnements humains de la ville peut être utilisée pour nourrir la réflexion sur le devenir des espaces urbains et métropolitains ? Quel est le potentiel des différentes formes tissulaires, configurations réticulaires, associations morpho-fonctionnelles, etc. à faire preuve de résilience et d'adaptativité dans le futur ? Peut-on fonder une géoprospective urbaine sur les bases de la pensée complexe et de la connaissance incertaine ? (Chapitre 5).
- Quelles nouvelles perspectives de recherche sur la forme urbaine s'ouvrent au géographe quantitativiste averti de la complexité des questions abordées et de la nécessité de l'ouverture interdisciplinaire ? (Chapitre 5).

4. Méthodologies de la connaissance incertaine sur la ville

4.1 La certitude de l'incertitude dans l'étude de la complexité urbaine

La connaissance de la complexité urbaine qui peut être inférée par l'analyse de son organisation spatiale ne peut qu'être incertaine. Cette observation n'a rien de surprenant, car nous voulons inférer à partir d'éléments observables (les formes urbaines, l'organisation spatiale des fonctionnements urbains), des aspects non directement observables de la complexité urbaine : le lien entre la forme et les fonctionnements, les processus morphogénétiques, les potentiels de développement futur, etc. Les incertitudes pouvant entrer dans ce genre de problèmes inverses sont multiples (équifinalité, multiplicité des plans d'observation d'un système complexe, bruit de fond dans des recherches observationnelles, impossibilité de déterminer avec précision les connaissances souhaitées, etc.). Se rajoutent à cela l'incertitude de l'appréhension des perceptions sociales des formes urbaines et celle de toutes les évaluations subjectives (faites par des experts ou par des usagers) des formes et des fonctionnements de la ville.

Il y a une relation entre la complexité du système urbain, et notamment de sa spatialité, et celle des approches cognitives que nous déployons pour appréhender cette réalité urbaine. Cette relation est reconnue (Simon 1962, Morin 1990, 1994, 2006, Salingaros 2005) et justifie également que l'on se penche un peu plus sur les apports que l'intelligence artificielle peut donner dans l'appréhension de la complexité du réel : « La quête d'une intelligence artificielle pour les machines correspond précisément à la tentative d'aller d'une simplicité stupide à une complexité organisée »¹¹ (Salingaros 2005, p. 26). L'analyse et la modélisation spatiale peuvent et doivent se renouveler dans cette direction, en rapprochant de plus en plus leurs algorithmes à la complexité de la pensée humaine et finalement le raisonnement que le binôme homme-machine peut produire à la complexité organisée de ses objets d'étude, ici la ville.

Quel rôle donner aux probabilités dans l'appréhension d'un système complexe ?

Il est pratiquement impossible de décrire un système complexe à très grande numérosité par un système d'équations déterministes. La thermodynamique et la mécanique statistique ont déjà montré depuis la fin du XIX^e siècle comment fournir des descriptions probabilistes du fonctionnement de systèmes complexes à très grande numérosité. Cela permet à Salingaros (2005) d'affirmer que la meilleure description que nous pouvons rechercher pour un système complexe comme la ville est en termes de distribution de probabilité prenant en compte les approximations nécessaires de notre connaissance sur ses fonctionnements. Or, la distinction entre la complexité non-organisée des physiciens et celle auto-éco-organisée des systèmes biologiques et sociaux (voir Chapitre 1) devrait déjà nous mettre en garde contre tout emprunt hâtif de méthodes et d'approches de modélisation venant des sciences physiques.

L'utilisation de modèles probabilistes a une longue histoire (remontant à Blaise Pascal) et a permis de développer, à partir du XIX^e siècle, un domaine de la statistique qui s'est révélé essentiel pour son application à l'investigation scientifique : la statistique inférentielle. Cette dernière bénéficie dès lors

¹¹ Ma traduction.

d'un arsenal formidable de développements théoriques et méthodologiques, ultérieurement complétés par les méthodes numériques de calibration, de rééchantillonnage, d'optimisation et de validation fournis par la puissance de calcul des ordinateurs.

L'opportunité d'utiliser les probabilités pour modéliser la connaissance incertaine fait cependant débat. Le renouveau du cadre classique des probabilités fréquentielles par les probabilités bayésiennes a permis d'élargir l'application des probabilités à un certain nombre de situations de connaissance incertaine. Dans la suite de ce chapitre je montrerai d'abord quel a été l'apport de l'approche probabiliste bayésien à la modélisation de connaissances incertaines sur la ville et les espaces métropolitains. Le problème que je poserai ensuite est le suivant : sommes-nous toujours capables de décrire un système complexe par des distributions de probabilité, fussent-elles bayésiennes ? J'argumenterai que la réponse est non : souvent nous n'en savons pas assez pour parvenir à une telle description. Quels autres formalismes s'offrent alors à nous, corrélativement à notre état de connaissance ? Je montrerai par-là comment mon cheminement intellectuel m'a porté à rechercher des formalismes moins contraignants, permettant de modéliser des incertitudes plus profondes, notamment en ce qui concerne les incertitudes épistémiques. Comme déjà anticipé, cette recherche m'a obligé à ouvrir un dialogue interdisciplinaire avec les approches de l'intelligence artificielle.

4.2 L'apport des probabilités bayésiennes

L'approche bayésienne ouvre des nouvelles perspectives à l'emploi des probabilités

Au fil de mes recherches plus méthodologiques, pratiquement depuis mes travaux de thèse, je me suis tout particulièrement engagé dans l'adaptation des modélisations probabilistes bayésiennes aux besoins de connaissance de la géographie urbaine.

L'approche bayésienne a renouvelé la modélisation statistique depuis la moitié du XX^e siècle (Jaynes 1968, Box et Tiao 1973, Jaynes 2003, Bolstad 2007) et a ensuite fondé un certain nombre d'algorithmes de *machine learning* en intelligence artificielle à partir des années 80 et 90. De façon générale, Drouet (2016) fait état du succès croissant que les méthodes bayésiennes ont dans différents domaines : en économie, dans l'étude du cerveau, dans les sciences médicales, dans les sciences juridiques, en épistémologie dans le domaine de l'aide à la décision en contexte d'incertitude. En ce qui concerne la géographie, Withers (2002), mais déjà Harvey (1969), ont montré les présupposés épistémologiques et l'intérêt pratique d'une géographie bayésienne. Withers, en particulier, reprend les travaux de Raftery (1995a) pour une approche bayésienne à la sélection de modèles en sciences sociales. Comme Drouet (2016) le résume bien, l'approche bayésienne est en train de devenir une nouvelle norme de conduite du raisonnement scientifique.

En reprenant Drouet (2016) l'édifice du bayésianisme aujourd'hui repose sur trois étages portant, respectivement, sur les croyances des agents rationnels à un moment donné, sur la dynamique des croyances et sur le raisonnement scientifique.

En ce qui concerne le premier point (les croyances des agents rationnels considérées de manière synchronique), le bayésianisme assume que les croyances de tout sujet relativement à un événement sont des évaluations graduées et que, pour être rationnelles, elles doivent être des probabilités. Pour rappel, les probabilités sont des quantités non négatives, comprises entre 0 et 1, que l'on peut attribuer à des phénomènes élémentaires disjoints au sein d'un univers des possibles, et pour

lesquelles la somme sur cet ensemble est égale à 1 (axiome de Kolmogorov). L'absence d'incertitude serait alors caractérisée par des croyances égales à 1 (phénomène certain) ou 0 (phénomène impossible), toutes les autres connaissances étant affectées par des degrés différents d'incertitude. Cette proposition élargit considérablement les applications (et les interprétations) possibles des probabilités : ces dernières ne fournissent pas seulement le modèle théorique de référence pour le comportement asymptotique des fréquences de phénomènes structurellement stables (probabilités fréquentielles) mais également le modèle pour des degrés de croyance d'agents rationnels en contexte d'incertitude.

Le raisonnement bayésien

Le second étage de l'édifice bayésien porte sur la manière dont un agent rationnel doit revoir ses croyances à la lumière d'une nouvelle connaissance. La révision des croyances est celle du conditionnement bayésien, qui utilise le théorème de Bayes. Imaginons que la connaissance du phénomène A soit incertaine : on peut alors affecter un degré de croyance *a priori* $P(A_i)$ à chaque issue possible A_i du phénomène A (ces issues sont des événements mutuellement exclusifs). Si l'on vient à connaître un second phénomène B avec certitude, et, en considérant que B est lié à A , l'on connaît la vraisemblance de B pour chaque A_i , c'est-à-dire la probabilité d'observer B lorsque A_i est vrai, $P(B|A_i)$, alors la probabilité *a posteriori* de chaque A_i , en connaissant B est donnée par :

$$p(A_i | B) = \frac{p(B|A_i)p(A_i)}{p(B)} = \frac{p(B|A_i)p(A_i)}{\sum_i p(B|A_i)p(A_i)} \quad (4.1)$$

La probabilité de l'évidence $p(B)$ dans le conditionnement de Bayes est une simple constante de normalisation qui peut être calculée grâce au théorème de la probabilité globale.

En assouplissant le contexte de connaissance, on pourrait supposer que tant la connaissance du phénomène A que celle du phénomène B soient affectées d'incertitude. On attribue alors des degrés de croyance aux différentes observations possibles de B . Dans ce cas le théorème de Bayes (4.1) est remplacé par la règle de Jeffrey (Shafer 1981) :

$$q(A_i | B) = \sum_j q_j p(A_i | B_j) \quad (4.2)$$

Où les croyances q_j sont attribuées aux B_j , différentes valeurs possibles de B , et chaque $p(A_i|B_j)$ est calculé selon (4.1). Cette modélisation bayésienne est une première opérationnalisation des croyances révisables identifiées par MacFarlane (2013) comme étant caractéristiques du raisonnement humain (voir Section 1.2).

Le troisième étage de l'édifice bayésien porte sur la généralisation du raisonnement de l'agent rationnel à une classe particulière d'agents rationnels pris dans leur ensemble : les membres de la communauté scientifique. Dans son ouvrage posthume, Jaynes (2003) développe plus particulièrement l'apport de l'approche bayésienne au raisonnement scientifique. Pour la communauté scientifique, des classes particulières d'énoncés peuvent prendre le rôle de A et de B dans les formules du conditionnement bayésien. Les hypothèses scientifiques alternatives occupent la place des A_i et les évidences empiriques la place de B (théorème de Bayes) ou, plus rarement, des B_j (règle de Jeffrey). Cela revient à dire que les hypothèses scientifiques peuvent faire l'objet de croyances graduées et que leur évaluation rationnelle consiste à appliquer un conditionnement bayésien à la lumière de toutes les informations pertinentes disponibles. Sont ainsi jetées les bases d'une épistémologie bayésienne, fondée sur une évaluation probabiliste bayésienne des hypothèses scientifiques.

Les apports de l'approche bayésienne peuvent être mieux saisis dans la comparaison avec l'approche plus classique des probabilités fréquentielles comme fondement de la modélisation statistique de phénomènes observés. L'approche fréquentielle nécessite ainsi de choisir implicitement une distribution de probabilité sous-tendant le modèle statistique. Des tests de significativité sont communément employés pour valider ce modèle. En réalité ces derniers ne peuvent qu'écarter avec un seuil d'erreur donné l'hypothèse alternative, correspondant normalement à l'absence de modèle ou à la loi de probabilité possédant une paramétrisation banale. Les hypothèses du modélisateur restent ainsi implicites et non discutées dans le processus de modélisation et le test de significativité ne nous renseigne pas directement sur la plausibilité du modèle par rapport à d'autres modèles alternatifs, mais seulement sur la non plausibilité de l'absence de modèle.

Les probabilités bayésiennes permettent d'intégrer explicitement les hypothèses du modélisateur, sous la forme d'un ou plusieurs modèles auxquels sont attribués des degrés de croyance *a priori*. Dans certains contextes, on peut faire l'hypothèse que le bon modèle appartient à une certaine famille de modèles. On intègre ensuite le contenu informationnel porté par les données (les évidences empiriques du conditionnement bayésien) et on arbitre entre les différents modèles ou on optimise les paramètres de la famille de modèles pour obtenir le modèle le plus vraisemblable au sein de cette famille. Dans les deux démarches on rend le processus de modélisation plus explicite, on intègre les pré-connaissances du modélisateur en les caractérisant par des degrés de croyance et on ne sort pas un modèle validé (il ne l'est jamais, même pas dans l'approche fréquentielle) mais un modèle pour lequel le degré de croyance a été révisé et/ou pour lequel les paramètres ont été optimisés pour rendre compte de l'évidence empirique. Le raisonnement prend ici clairement une tournure plus abductive.

Le raisonnement bayésien au secours du « *small data* »

Comme déjà remarqué de façon générale sur les questions d'incertitude (Section 1.4), l'application des méthodes bayésiennes en géographie a d'abord concerné la modélisation des incertitudes des données géographiques, avec une attention particulière aux spécificités de l'information géographique, notamment à sa spatialité. Les implications d'une épistémologie bayésienne, soulevées par Harvey (1969) et Raftery (1995a, 1995b) ont trouvé relativement peu d'écho.

En ce qui concerne mes travaux, j'ai particulièrement contribué au développement d'approches bayésiennes à l'analyse de l'organisation urbaine et métropolitaine, en m'attaquant à tour de rôle à la fouille de données (notamment en matière de relation forme/fonctionnement), à la formalisation de connaissances expertes incertaines, à l'exploration de futurs possibles/plausibles et à la recherche de régularités, conscient du fait que les situations archétypiques n'existent qu'en relation à d'autres situations plus hybrides et émergeant aux archétypes avec incertitude. Les approches inductives de fouille de données ont particulièrement montré l'intérêt d'intégrer des pré-connaissances théoriques « faibles » au sein de démarches *data-driven*, ce qui constitue pour moi un acquis important dans la perspective d'exploiter des données massives (*big data*) dans la recherche urbaine. En même temps, la formalisation des connaissances expertes et le retour d'expérience de cas d'études, suggèrent de ne pas délaisser la démarche bien plus classique du *small data* (pas ici dans le sens marketing proposée par Lindstrom 2016), tout en l'informant du caractère incertain de nos connaissances. Contrairement à un certain air du temps, les situations de *small data* continuent à être très fréquentes dans la recherche scientifique. L'approche bayésienne peut aider à formaliser ces contextes de connaissance incertaine.

C'est précisément une recherche en contexte de *small data* que je souhaite présenter en premier, pour son lien direct avec l'épistémologie bayésienne que je viens de présenter. Le contexte du *small*

data est celui où le chercheur formule une multitude d'hypothèses théoriques mais ne peut les confronter qu'à un nombre limité de cas d'études bien formalisés. Comment alors monter en généralité dans nos connaissances ? Comment formaliser l'incertitude de ces connaissances ? Comment tirer profit de toute nouvelle connaissance ?

Incertitudes, pluralité de modèles et small data pour les effets des politiques de densification urbaine

Dans Fusco et Tettamanzi (2017) j'ai décliné ces questions au domaine très spécifique de l'évaluation des politiques de densification qui sont actuellement prônées en France et en Europe pour contrecarrer l'étalement urbain dans un but plus général de durabilité urbaine.

Les professionnels de l'aménagement et les décideurs publics considèrent que parvenir à un développement urbain durable soit essentiellement une question de suivi d'indicateurs, de prise de décision et d'implémentation de politiques dans un contexte de théorie scientifiques bien établies et de connaissances certaines sur la ville. Au contraire, **comprendre, mesurer et gérer la durabilité urbaine sont des tâches beaucoup plus complexes et l'incertitude est omniprésente dans le type de connaissance que nous avons sur la ville supposée durable**. La durabilité urbaine est en effet une question multidimensionnelle (avec des enjeux économiques, environnementaux, sociaux et urbanistiques), dans laquelle nous devons évaluer des fonctionnements observables par rapport à un état normatif futur auquel nous souhaitons les rapprocher, et cela dans l'hypothèse que les politiques implémentées puissent parvenir à cet objectif. Clairement, ces politiques interagissent avec les dynamiques spontanées des acteurs urbains, dynamiques qui sont appréhendées de façon approximative et pour lesquelles différentes hypothèses peuvent être formulées quant à leur interaction avec les politiques implémentées. Cela revient au fait que les villes sont des systèmes complexes auto-organisés, dont nous avons une connaissance partielle, incomplète, parfois contradictoire (quand différents points de vue sont pris en compte). Encore plus, lorsqu'il est question du développement futur de la ville, différents scénarios devraient être pris en compte, question qui sera ultérieurement développée dans le Chapitre 5.

La recherche ici présentée s'est focalisée sur les possibles effets des politiques visant à réduire l'étalement urbain, un enjeu crucial pour la ville durable. Laisser la ville s'étendre à faible densité et selon des schémas de forte spécialisation fonctionnelle (espaces résidentiels pavillonnaires accompagnés de quelques concentrations commerciale, artisanale ou tertiaire) produit des conséquences directes (surconsommation de sols agricoles et naturels) et indirectes (mobilité accrue, dépendance automobile, émissions de gaz à effet de serre, besoin de nouvelles infrastructures routières particulièrement coûteuses et/ou forts niveaux de congestion routière) qui mettent à mal les objectifs du développement durable urbain. L'interaction spatiale entre la ville constituée et ses espaces périurbains joue également un rôle important. Camagni et al. (1998) parlent de dilemme social entre la ville et le périurbain : les ménages souhaitent bénéficier des économies d'agglomérations permises par la concentration urbaine (opportunités d'emploi, services, etc.) mais essayent individuellement d'éviter les déséconomies d'agglomération de la vie dans la ville dense (congestion, faible qualité environnementale). En déménageant dans le périurbain, ils obtiennent des meilleures aménités environnementales tout en étant capables de bénéficier des services de la ville, grâce à une mobilité automobile accrue. Mais, ainsi faisant, ils augmentent la congestion et la pollution de la ville, dégradant la qualité de vie de ses habitants et induisant d'autres ménages à déménager dans le périurbain. Des stratégies de densification, à la fois dans la ville-centre et dans le périurbain, ont ainsi été proposées (European Commission 1996, Calthorpe et Fulton 2001, Duany et al. 2000, Calthorpe

2011) pour limiter et possiblement arrêter l'étalement urbain. Mais ces stratégies partent d'hypothèses relativement fortes sur les impacts et l'acceptabilité sociale de la densification. En réalité, on peut identifier des hypothèses alternatives et contradictoires dans une riche littérature sur la capacité des politiques d'aménagement urbain à arrêter l'étalement urbain par des mesures de densification (Breheny 1997, Fouchier et Merlin 1994, Charmes 2010, PUCA 2014). En Amérique du Nord, Gordon et Richardson (1996, 1997) ont mis en question à la fois la faisabilité et le bien fondé des politiques visant à contrecarrer l'étalement urbain, voyant la périurbanisation comme l'allocation la plus efficace des sols, produite par les marchés dans le respect des préférences des ménages. En Europe, le consensus est plus ample sur les dangers de permettre un étalement incontrôlé dans des contextes urbains beaucoup plus contraints. Les conséquences négatives sur les centres-villes traditionnels (souvent observés en Amérique du Nord) sont également perçues comme inacceptables pour les villes européennes, compte tenu des valeurs économique, patrimonial et symbolique des centralités traditionnelles.

Mais même au sein de ce consensus, des hypothèses différentes peuvent sous-tendre des modèles différents de l'interaction entre croissance démographique, congestion, relation ville/périurbain, politiques de densification, perception des populations et étalement urbain. Ces hypothèses reflètent les croyances des scientifiques et des décideurs dans les issues les plus plausibles des tendances observées de l'étalement urbain dans les villes européennes et dans la capacité des politiques de densification à avoir un réel impact sur ces tendances. Je pense que le géographe modélisateur souhaitant accompagner la formulation des politiques urbaines devrait intégrer et non pas ignorer cette multiplicité de modèles possibles. Je suis en cela le principe des explications multiples déjà formulé par Epicure : si plusieurs théories peuvent s'accorder aux phénomènes observés, retiens-les toutes.

Dans Fusco et Tettamanzi (2017) j'ai ainsi proposé deux modèles alternatifs, extrêmement simplifiés des relations pouvant exister entre les politiques de densification et l'étalement urbain. Ces modèles reflètent deux visions particulièrement saillantes du débat sur la densification urbaine en Europe, et plus particulièrement en France. Le premier modèle est relativement neutre sur les impacts directs de la densification sur les perceptions des habitants et considère que la densification peut produire des effets indirects positifs dans une gestion plus rationnelle des sols, et dans la qualité de vie en ville et dans le périurbain, lorsqu'elle est accompagnée d'autres mesures de requalification des espaces publics et de développement de TCSP (transports en commun en site propre). Le développement des emplois dans le périurbain est en revanche évalué négativement, car il affaiblit les centralités traditionnelles et risque d'accélérer à terme l'étalement urbain. Ce modèle correspond au point de vue majoritaire des urbanistes en Europe et aux recommandations officielles tant du gouvernement français que de la Commission Européenne (European Commission 1996).

Le second modèle assume un rôle positif du développement des emplois périurbains dans la réduction de la congestion urbaine, une vision partagée par des nombreux plans d'urbanisme en France et en Europe, même si successivement remise en question par Wiel (1999). Surtout, le second modèle considère que la densification sera perçue négativement par la majorité des habitants et risque d'aggraver les problèmes de congestion, surtout dans l'absence de politiques alternatives de transport. Globalement, ce modèle est plus pessimiste sur la capacité de l'aménagement urbain à arrêter l'étalement urbain et suggère des objectifs plus limités de réduction de la croissance périurbaine.

Des nombreuses incertitudes affectent chaque modèle : les phénomènes étudiés sont représentés par des indicateurs synthétiques, les connaissances sur les relations causales entre ces variables dans

chaque modèle sont à leur tour incertaines, les mêmes causes peuvent parfois produire des effets différents compte tenu des simplifications introduites dans les modèles (rôle joué par des phénomènes non modélisés), certaines variables sont non directement observables (perceptions des habitants), etc. J'ai ainsi choisi d'implémenter les deux modèles selon le formalisme des réseaux bayésiens (voir section suivante). Pour l'instant on retiendra que les réseaux bayésiens organisent les connaissances expertes sous-tendant les deux modèles par un système de relations probabilistes.

Le point principal développé dans cette recherche n'est cependant pas le modèle probabiliste en soi, mais le fait que deux différents modèles probabilistes coexistent et que ces deux modèles ne devraient pas être considérés comme les seuls modèles explicatifs possibles de l'étalement urbain. Un expert dans un contexte d'aide à la décision pour l'aménagement urbain pourrait être plus ou moins confiant dans chacun de ces deux modèles, mais devrait encore laisser la place à un certain scepticisme sur la capacité de chacun de ces deux modèles à appréhender correctement les phénomènes étudiés. On devrait ainsi accorder une certaine plausibilité au fait que les deux modèles échouent à expliquer la relation entre politiques de densification et étalement urbain et qu'un troisième modèle, encore inconnu, ou même qu'aucun modèle, ne puisse lier l'étalement urbain aux tendances sociodémographiques, aux préférences des ménages et aux politiques d'urbanisme.

Raftery (1995a, 1995b) a déjà proposé une approche bayésienne à la sélection de modèles dans les sciences sociales. Le cœur de cette approche revient à identifier le meilleur modèle entre deux modèles alternatifs ($M1$ et $M2$), en connaissance d'une évidence empirique E , par le conditionnement bayésien des croyances *a priori* dans les deux modèles ($p(M1)$, $p(M2)$). En utilisant le théorème de Bayes, on peut évaluer *a posteriori* les deux modèles en tenant compte de l'évidence :

$$\frac{p(M1 | E)}{p(M2 | E)} = \frac{p(E | M1) p(M1)}{p(E | M2) p(M2)} \quad (4.3)$$

Le premier terme du côté droit de l'équation est le facteur de Bayes, défini comme le rapport entre les vraisemblances de l'évidence empirique relatives à chacun des deux modèles. Dans les approches bayésiennes souhaitant optimiser chaque modèle par rapport à l'évidence, on considère normalement l'espace des paramètres de chaque modèle et les vraisemblances doivent alors être calculées comme l'intégral des valeurs sur tout l'espace des paramètres (un problème souvent non calculable pour la plupart des modèles, nécessitant des solutions approximées). Ici nous considérons les paramètres des modèles comme étant fixes et reflétant la connaissance fournie par deux groupes d'experts. Dans ce cas, les vraisemblances peuvent être obtenues par simple propagation des croyances dans les deux réseaux bayésiens. En même temps, comme anticipé, notre cadre de discernement pour les modèles possibles est plus riche :

$$\Theta_{\text{Modèles}} = \{M1, M2, \dots, \text{Autre}\}$$

Où M_i sont les modèles possibles considérés et *Autre* représente toute autre modèle possible pas encore formulé. Le modélisateur peut avoir des croyances *a priori* sur ces options possibles (inclue l'option *Autre*) et peut calculer les vraisemblances des modèles disponibles. En revanche, il ne peut pas calculer la vraisemblance $p(E | \text{Autre})$, qui lui est nécessaire pour effectuer la révision des croyances par conditionnement bayésien. Nous avons ainsi proposé une approche pour attribuer une vraisemblance à l'option *Autre* en suivant les principes suivants :

1. $p(E | \text{Autre}) = 0$ si au moins un des modèles explicatifs formulés M_i est complètement plausible (pour au moins un i , vraisemblance $M_i = 1$) ;
2. $p(E | \text{Autre}) = 1$ si aucun des modèles explicatifs formulés n'est minimalement plausible (pour tous les i , vraisemblance $M_i = 0$) ;

3. $p(E/Autre)$ doit croître au fur et à mesure que la vraisemblance des modèles explicatifs formulés diminue.

Ces principes correspondent à la quête humaine d'explications pour les phénomènes observés, en considération de la connaissance explicative couramment acceptée et de sa capacité à rendre compte des nouveaux phénomènes. Si, entre plusieurs modèles couramment acceptés, au moins un d'entre eux fournit une explication plausible des phénomènes nouvellement observés, on ne ressent pas de besoin particulier de nouveaux modèles et la nouvelle évidence empirique est utilisée pour arbitrer entre les modèles disponibles, suivant l'approche bayésienne de Raftery (1995a). La plausibilité d'un nouveau modèle, qui reste à déterminer, est élevée quand un nouveau phénomène ne peut pas être plausiblement expliqué par aucun des modèles disponibles. L'histoire de la science montre souvent ces dynamiques internes.

Dans Fusco et Tettamanzi (2017) nous avons également donné des implémentations précises à cette heuristique d'attribution de vraisemblance en utilisant des fonctions linéaires, sub-linéaires et supra-linéaires, qui modélisent différemment la réaction au manque de plausibilité des modèles existants.

Le cas d'étude de Grenoble dans le raisonnement bayésien

Imaginons maintenant qu'un géographe modélisateur soit relativement confiant dans les deux modèles précédemment formulés pour rendre compte des relations entre politiques de densification et étalement urbain dans les grandes agglomérations françaises. Il ne veut pas s'engager sur aucune de ces deux options supportées par la littérature, tout en voulant accorder une croyance résiduelle à la possibilité qu'un autre modèle, pas encore formulé, puisse expliquer l'étalement urbain des villes françaises. Il pourrait assigner les croyances *a priori* 0,45, 0,45 et 0,1 aux modèles *M1*, *M2* et *Autre* dans le cadre de discernement \mathcal{O} . Comment devrait-il réviser ces croyances à la lumière d'un cas d'étude auquel ces modèles sont sensés s'appliquer ?

Dans cette recherche nous avons utilisé le cas d'étude de l'agglomération de Grenoble comme exemple paradigmatique d'évidence empirique. Dans les vingt dernières années, Grenoble et les communes de son aire métropolitaine ont en effet implémenté une des plus cohérentes politiques de densification en France, à la fois dans la ville constituée et dans les extensions périurbaines, suite au schéma directeur de 2000 (AURG 2000, DDT Isère 2015) et au programme de rénovation urbaine de 2005 (GRA 2005). Les politiques urbaines ont néanmoins accompagné le développement d'emplois périurbains et les dynamiques suivantes ont pu être observées sur la période 1999-2013 : stabilité de la population de la ville-centre, fort développement démographique des communes périurbaines et importante expansion des espaces périurbains (corrélative à l'extension de l'aire urbaine fonctionnelle). En simplifiant à peine le diagnostic, on pourrait dire que l'évidence empirique est celle d'une poursuite soutenue de l'étalement urbain en dépit des politiques de densification urbaine et périurbaine, des politiques de rénovation et (différemment évalué par les deux modèles) du développement des emplois périurbains. L'interprétation de cette évidence empirique en termes de connaissance certaine pourrait être remise en discussion, mais cela ne changerait en rien notre approche, demandant seulement une attribution de croyances aux différentes évaluations de l'étalement urbain grenoblois, et l'utilisation de la règle de Jeffrey (4.2) au lieu du théorème de Bayes (4.1) pour la révision des croyances.

Grenoble est un clair contre-exemple pour les deux modèles communément admis. Il est d'autant plus un contre-exemple pour le premier modèle car, à la seule exception du développement des

emplois périurbains, toutes les politiques sous-tendues par ce modèle semblent avoir été mises en place par les autorités locales. Notamment, la ville-centre n'a pas été capable d'absorber sa part de la croissance démographique de l'aire métropolitaine, probablement à cause des phénomènes de gentrification et de la permanence de l'attrait du cadre périurbain sur une part de la population. Après révision bayésienne, le cadre des connaissances de notre modélisateur est affecté par des plus grandes incertitudes : si le second modèle devient plus plausible que le premier, ce dernier ne peut pour autant pas être écarté et, surtout, la plausibilité d'un troisième modèle (ou de l'absence de tout modèle) devient comparable à celle du second. Bien évidemment ces résultats dépendent du type de réponse (linéaire ou sub-linéaire) au manque des plausibilités des modèles admises et aux croyances *a priori* du modélisateur.

On retiendra, néanmoins, que le cadre de révision bayésienne des croyances n'infirme pas de façon absolue les deux modèles de départ (du fait, par exemple, d'un degré de croyance proche de 0). Un seul contre-exemple n'est pas suffisant à invalider ces modèles, étant donné les croyances *a priori*. D'autre part, la France possède environ 50 aires métropolitaines régionales de plus de 200 000 habitants, ayant appliqué des politiques plus ou moins cohérentes de densification pour contrecarrer l'étalement urbain. La proposition qui doit être évaluée est la capacité de nos deux modèles à rendre compte de ce domaine d'étude et seulement une analyse plus exhaustive de ce domaine pourrait arriver à une telle conclusion.

Si une telle analyse devait produire une valeur suffisamment faible de croyance *a posteriori* pour l'un des deux modèles, ce dernier pourrait alors être disqualifié en tant que modèle pertinent pour notre domaine. Si tel était le cas pour les deux modèles, le géographe devrait conclure au besoin d'un modèle alternatif, basé sur des hypothèses théoriques différentes ou mieux prenant en compte les dynamiques spécifiques observées dans les métropoles régionales françaises. **Comme souvent dans les sciences sociales**, et comme déjà rappelé par Passeron (1991, voir Section 1.2), **nous restons dans une approche à la falsifiabilité des théories scientifiques qui est beaucoup plus faible que celle classique de Popper** : les évidences empiriques des cas d'étude concourent à rendre les explications théoriques plus ou moins plausibles, jusqu'au point où la communauté scientifique, étant donné l'accumulation de cas d'études contradictoires avec un modèle théorique particulier, décide que ce modèle n'est plus acceptable. **Dans ce contexte, notre heuristique pour l'attribution d'une vraisemblance aux modèles inconnus et l'approche bayésienne à l'évaluation de modèles alternatifs peuvent fournir un protocole adapté, à condition que les croyances sur les modèles et les évidences puissent être formalisées en tant que probabilités additives.** Cette approche est particulièrement précieuse dans les contextes de *small data*, lorsque le nombre de cas d'études disponibles est relativement réduit et les croyances *a priori* des experts revêtent un rôle très important. Cette situation est relativement fréquente dans la recherche en géographie urbaine, où la complexité de l'objet d'étude laisse ouverte la place à plusieurs théories alternatives tandis que les cas d'études suffisamment bien formalisés pour répondre aux besoins des différentes théories sont rares.

Cependant, la formulation des croyances en tant que probabilités et la révision bayésienne des croyances pour arbitrer entre hypothèses alternatives ne sont pas la seule option pour le géographe attentif aux questions d'incertitude. L'intelligence artificielle a ainsi dédié un effort considérable pour concevoir des cadres formels et computationnels alternatifs pour représenter et traiter la connaissance incertaine. Comme j'aurai l'occasion de montrer dans la Section 4.5, les avantages et les limites des probabilités bayésiennes doivent être évalués dans le contexte de ces alternatives.

4.3 Connaissance experte et apprentissage dans les bases de données : les réseaux bayésiens

Les probabilités bayésiennes tirent profit de l'information des grandes bases de données

Lorsque l'on dispose de grandes bases de données (éventuellement massives) le problème de la connaissance *a priori* avec laquelle on initialise les modèles bayésiens devient secondaire, voire négligeable. Par successives révisions des croyances, les paramètres probabilistes sont essentiellement inférés des données en ne portant presque aucune mémoire de l'initialisation *a priori* : *data swamp the priors* (les données noient les connaissances préalables). Dans les applications de fouille de données (*data mining*) les bases de données permettent d'accéder à une information statistique exploitable par la modélisation probabiliste. Graduellement, la modélisation bayésienne quitte le domaine de la formalisation de la connaissance experte pour devenir une approche d'apprentissage automatique par *machine learning*. L'approche est celui de la découverte de connaissances dans les bases de données.

En l'absence d'une théorie forte permettant de formuler des hypothèses qui doivent être validées/invalidées par les données, les algorithmes bayésiens de recherche automatisée de modèles ouvrent la voie à une approche inductive, *data-driven*. À être plus précis, l'architecture de recherche qu'ils implémentent est abductive. L'approche de la maximisation des vraisemblances est en soi une abduction : l'algorithme génère une pluralité d'hypothèses (les modèles), ensuite il considère la probabilité avec laquelle ces modèles pourraient générer les données observées s'ils étaient vrais (c'est la vraisemblance de chaque modèle en connaissant les données). De façon itérative, l'algorithme compare ces modèles par rapport à leurs vraisemblances respectives. La différence avec l'approche du *small data*, où l'expert fournit le modèle, est que maintenant tous les modèles possibles, respectant éventuellement un certain nombre de contraintes, sont considérés et comparés par les algorithmes d'apprentissage automatique. Pour éviter le surapprentissage, les algorithmes peuvent pénaliser les modèles trop compliqués, en suivant le principe du rasoir d'Occam. Leur fonction objectif est alors un mélange de la vraisemblance du modèle avec la parcimonie de son architecture (notamment en termes de nombre de paramètres à estimer).

Les réseaux bayésiens peuvent modéliser des systèmes de causalité probabilisée

Un des formalismes les plus puissants et souples de modélisation bayésienne dans ce domaine est celui des réseaux bayésiens (Jensen 2001, Korb et Nicholson 2004). Curieusement, les réseaux bayésiens avaient commencé à être développés dans les années 70 et 80 comme solution rigoureusement probabiliste de formalisation des systèmes experts (Ignizio 1991, Russell et Norvig 1994). Les avancées dans les solutions algorithmiques au cours des années 80 et 90 en ont fait un puissant outil de découverte de connaissances dans les bases de données.

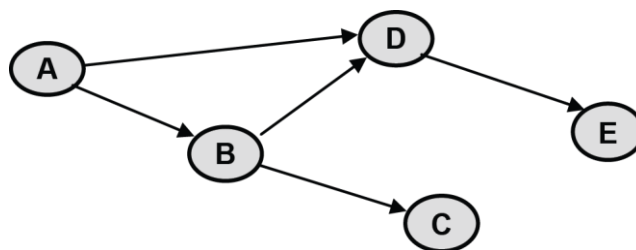


Figure 4.1 - La structure d'un simple réseau bayésien de cinq variables.

Le terme réseau bayésien a été promu par Pearl (1985) pour décrire une méthode d'inférence probabiliste bayésienne (dérivant des conclusions logiques de faits connus et assignant à elles un degré de croyance pour caractériser leur incertitude) entre nœuds reliés dans une structure de graphe. Le réseau bayésien couple ainsi une représentation graphique avec un contenu mathématique associé. Graphiquement, il est constitué de nœuds (représentant des variables) et d'arcs orientés qui les relient (représentant des liens de cause-à-effet entre les variables). **Le graphe orienté** qui en résulte (Figure 4.1) **constitue la structure du réseau**, résumant l'information qualitative sur la causalité entre les variables. On remarquera que la structure d'un réseau bayésien ne peut pas contenir de boucles, tout comme dans les modèles causaux des équations structurelles (Kaplan, 2000). Nous verrons dans la suite comment cette contrainte pourra être éliminée dans le cas de modèles dynamiques.

Du point de vue mathématique, chaque cercle représente une variable stochastique qui peut être décrite par une fonction de probabilité (éventuellement une table de probabilités conditionnelles pour des variables discrètes). **Les valeurs numériques de la fonction (ou table) de probabilité constituent les paramètres du réseau**. Couplant la théorie des probabilités à la théorie des graphes, les réseaux bayésiens permettent de traiter deux problèmes centraux de la modélisation mathématique : l'incertitude et la complexité (Jordan 1998).

L'idée centrale de ces modèles est celle de la modularité : un système complexe peut être construit par combinaison de parties plus simples, interconnectées entre elles. Cela est possible car la distribution des probabilités conjointes des variables du réseau peut être factorisée selon la structure du graphe sous-jacent. Plus précisément, en respectant la condition causale markovienne (Pearl 2000, Drouet 2007), la fonction (ou table) de probabilité de chaque nœud dépend uniquement des valeurs de ses nœuds parents et la probabilité totale du réseau est ainsi égale au produit des probabilités conditionnelles de chaque nœud par rapport à ses parents. Sur un ensemble de variables X_1, X_2, \dots, X_n , la distribution de probabilité jointe est donnée par :

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i \mid \text{Par}_{x_i})$$

où Par_{x_i} sont les parents de la variable X_i dans la structure du réseau. De cette façon, le calcul global de la probabilité d'une configuration de valeurs dans le réseau est reconduit au produit des probabilités des valeurs de chaque variable, conditionnellement à la connaissance de ses variables parentes. Pour le réseau de la Figure 4.1 nous obtenons :

$$P(A, B, C, D, E) = P(A) P(B|A) P(C|B) P(D|A,B) P(E|D)$$

Le réseau bayésien généralise et implémente le théorème de Bayes (et la règle de Jeffrey) à un grand nombre de variables connectées par un graphe de relations causales. Il devient dès lors possible de modéliser des véritables systèmes de causalité, plus à même de rendre compte de la complexité des systèmes réels.

Les flèches orientés, constituant les arcs du graphe peuvent, sous certaines conditions (Pearl 2000), être interprétées en tant que liens de cause-à-effet entre les variables du modèle. L'interprétation des liens de causalité en question diffère selon les auteurs (Drouet 2007, Williamson 2005, Pearl 2000) : il peut s'agir de causalité probabiliste (l'effet d'une cause est précisément celui d'augmenter la probabilité des effets) ou de causalité déterministe mal connue (la relation de causalité garde une définition strictement déterministe mais, étant mal connue, elle est modélisée par des relations probabilistes). J'emploierai alors le terme épistémologiquement plus neutre de causalité probabilisée, sous-entendant que l'utilisation des probabilités est une option de modélisation, indépendamment de

l'interprétation philosophique de la nature des relations entre les phénomènes. Il s'agit d'une option déjà défendue par Harvey (1969) dans le domaine de la modélisation géographique.

Le réseau bayésien peut être directement construit par le modélisateur ou être appris d'une base de données. Tout mélange des deux approches est également possible (par exemple structure totalement ou partiellement fournie par le modélisateur et paramètres appris d'une base de données). Grâce à la révision bayésienne, l'apprentissage incrémental des modèles est également possible : un modèle construit sur des connaissances *a priori* et sur les données initialement disponibles, peut successivement intégrer le contenu informationnel de nouvelles données, et éventuellement diminuer l'apport des données les plus anciennes, si le modèle se veut adaptatif par rapport à des relations probabilistes changeant au cours du temps.

L'apprentissage automatique de la structure et des paramètres d'un réseau bayésien à partir d'une base de données, implémentant l'approche abductive précédemment évoquée est computationnellement extrêmement onéreux dès que le réseau atteint des dimensions non banales. Les algorithmes les plus couramment utilisés sont alors des algorithmes de recherche itérative sous-optimaux qui limitent leur recherche à un sous-ensemble des structures possibles (Korb et Nicholson 2004). Ce sous-ensemble est défini par le modélisateur qui exprime sa connaissance préalable du domaine d'étude dans la forme de contraintes pour l'algorithme de recherche (liens causaux interdits ou obligatoires, ordre d'évaluation des variables, pans entiers de la structure à considérer comme une pré-connaissance théorique qui peut être éventuellement modifiée, mais qui doit guider la recherche des meilleures solutions, etc.). La pénalisation des structures trop compliquées car comportant un nombre trop élevé de paramètres limite également le nombre de structures à explorer, tout en évitant le surapprentissage du modèle (voir supra).

Les réseaux bayésiens peuvent accompagner différents types de raisonnement

Une fois le réseau construit, celui-ci peut produire des simulations probabilistes du modèle implémentées avec une liberté complète dans le choix des variables d'entrée et sortie. Dans la Figure 4.2 sont ainsi montrés les principaux types de raisonnement possibles à l'aide d'un réseau bayésien. Les variables connues (éventuellement de manière incertaine, dans la forme de probabilités ou de vraisemblances) sont rentrées dans le réseau en tant qu'"évidences", des "requêtes" sont alors effectuées pour connaître en probabilité les valeurs d'autres variables dans le réseau¹² :

- le raisonnement peut être diagnostique, pour inférer en probabilité la valeur des causes d'un effet observé ;
- il peut être prédictif, pour déduire les conséquences d'un événement ;
- il peut être inter-causal en utilisant la connaissance d'un effet et d'une de ses causes pour inférer la valeur d'autres causes possibles ;
- il peut finalement combiner la connaissance (éventuellement imparfaite) de tout sous-ensemble de variables pour effectuer une inférence probabiliste sur les autres.

La possibilité d'assembler une multitude de mécanismes participant au fonctionnement d'un système complexe existait déjà dans le formalisme des systèmes d'équations différentielles de la dynamique des systèmes (Forrester 1969). Elle manquait en revanche dans les approches de modélisation statistiques couramment utilisées tant dans les sciences naturelles que dans les sciences

¹² Conventions utilisées dans la construction des graphiques de la Figure 4.2 : le réseau est centré sur l'événement *E*, ayant un parent *P* et un descendant *D* ; *C* est un co-parent de *E* par rapport à *P* et *X* un second descendant.

sociales. Avec la seule exception des modèles d'équations structurelles (Kaplan 2000), qui gardent en effet des fortes similitudes avec les réseaux bayésiens, la modélisation statistique était précédemment limitée à des modèles trop simplificateurs de la complexité du réel : modèles de régression multiple, modèles linéaires généralisés, modèles d'analyse de variance ... L'introduction d'architectures hiérarchisées, la recherche automatique des meilleurs régresseurs, l'introduction de relations non-linéaires, le développement d'approches non paramétriques ne permettent pas pour autant à ces formalismes de modéliser des systèmes complexes d'interactions entre une multitude de variables.

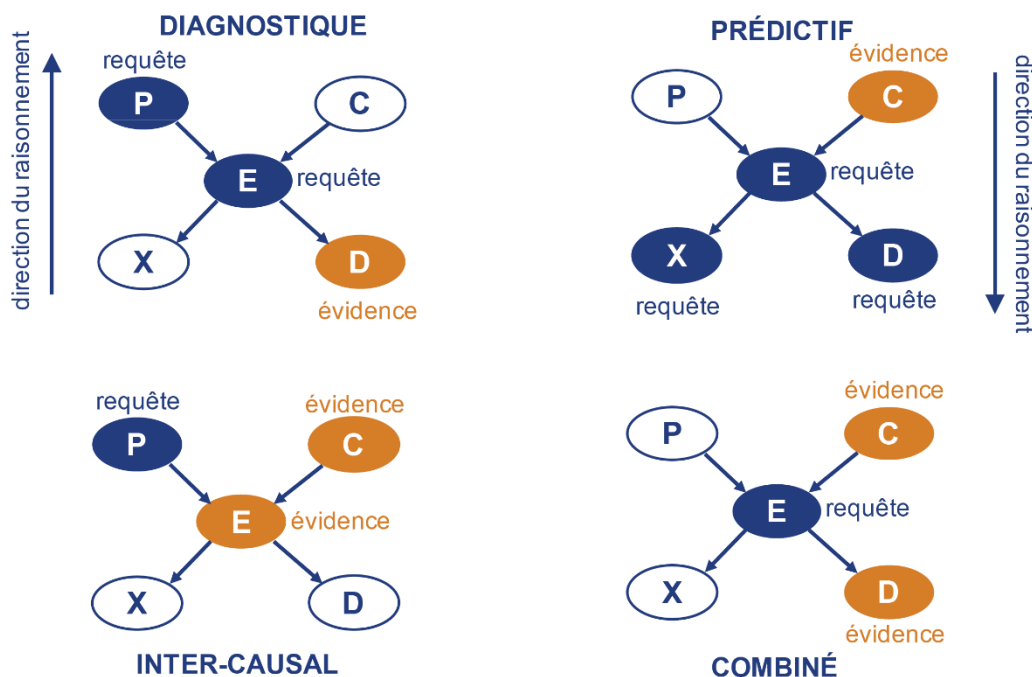


Figure 4.2 : Types de raisonnement dans un Réseau Bayésien (d'après Korb et Nicholson, 2004)

D'autre part, les systèmes d'équations différentielles ne permettent pas des approches de recherche *data driven* (au mieux, les données sont utilisées pour calibrer et valider qualitativement des modèles théoriques) et restent en tous cas réfractaires à une évaluation statistique. Les modèles d'équations structurels, tout en se situant dans la famille des modèles statistiques, reposent également sur les hypothèses théoriques du modélisateur dans la formulation de son architecture.

D'autres formalismes connexionnistes entre variables nombreuses existent dans la famille des réseaux de neurones artificiels, depuis le travail fondateur de McCulloch et Pitt (1943), jusqu'au perspectives plus récentes présentées par Schmidhuber (2015). Ils permettent la découverte d'associations dans les bases de données et, dans la mesure où des approches floues ou probabilistes sont implémentés, la modélisation de connaissances graduées et incertaines. Il devient néanmoins beaucoup plus difficile d'employer ces formalismes pour identifier des relations de causalité structurant les systèmes réels où même pour coupler les pré-connaissances du modélisateur avec le contenu informationnel des données. Finalement, l'aspect boîte noire des réseaux de neurones rend cette approche plus adaptée à la prédiction inductive qu'à la compréhension des fonctionnements réels et au test d'hypothèses théoriques (fussent-elles faibles).

15 ans de recherche dans l'exploitation des réseaux bayésiens pour la connaissance urbaine

Je me suis intéressé à l'adaptation du formalisme des réseaux bayésiens pour la modélisation urbaine depuis ma thèse de doctorat (Fusco 2004). Dans ce travail, clairement fondateur pour la suite de mon parcours personnel de chercheur, j'ai abordé de façon bien plus détaillée des questions à peine effleurées dans le cadre de ces pages : quelles sont les différentes approches algorithmiques à l'apprentissage des structures et des paramètres des réseaux bayésiens (voir également Becker et Naim 1999, Korb et Nicholson 2004), dans quelle mesure les algorithmes de recherche automatique des réseaux bayésiens sont vraiment capables d'identifier des structures causales dans des bases de données dépourvues d'information temporelle (une question également abordée par Druzdzel et Simon 1993, Pearl et Russell 2000, Drouet 2007), comment mélanger les connaissances expertes et celles apprises des données dans des différents schémas de recherche et d'exploitation des réseaux bayésiens, quels sont les avantages et les inconvénients des réseaux bayésiens par rapport à d'autres techniques de modélisation.

Pour la suite de mon exposé, on retiendra les points suivants : **les réseaux bayésiens constituent à plusieurs égards un formalisme de modélisation unique. Ils permettent, d'intégrer l'incertitude des connaissances modélisées par l'approche des probabilités bayésiennes. Ils peuvent être produits par connaissance experte, par apprentissage des bases de données et par hybridation de ces deux approches.** Sous certaines conditions, ils peuvent fournir une modélisation des relations causales dans le système étudié et, finalement, cette modélisation peut **se rapprocher davantage de la complexité des systèmes réels** en intégrant un grand nombre de variables, des parcours de causalité multiples et enchevêtrés et l'influence de variables omises dans la modélisation. Disposant d'un réseau bayésien du système étudié, il est finalement possible d'utiliser l'inférence bayésienne de façon extrêmement souple (raisonnement diagnostique, prédictif, inter-causal, etc.).

Les réseaux bayésiens présentent également un certain nombre de limites pour leur application à la modélisation de connaissances géographiques incertaines sur la ville, notamment la difficulté à intégrer les boucles d'interaction, la non prise en compte de la spatialité des phénomènes et les contraintes inhérentes à la modélisation de l'incertitude par les probabilités. Je montrerai dans la suite les pistes parcourues dans mes recherches pour apporter des solutions à ces problèmes.

4.4 Adapter les réseaux bayésiens aux besoins des connaissances incertaines sur la ville

Intégrer l'espace et le temps dans la modélisation par les réseaux bayésiens

Le principal défi que j'ai dû relever dans le cadre de mes recherches a été l'adaptation du formalisme des réseaux bayésien aux spécificités de la modélisation géographique. Un réseau bayésien se présente en effet comme un modèle a-spatial d'interaction entre variables. L'interaction spatiale doit y être introduite de façon spécifique par le modélisateur.

Une seconde difficulté particulière est celle d'intégrer les boucles d'interaction, le graphe orienté acyclique d'un réseau bayésien ne pouvant pas inclure directement de boucles entre variables. Les possibles solutions sont ici soit l'introduction de la dimension temporelle, soit la délimitation du domaine d'étude de façon à privilégier une partie seulement du système complexe, dans laquelle les liens causaux offrent des asymétries plus facilement modélisables (contrevenant en cela à une

approche de complexité généralisée, car on n'observerait pas le système complexe dans son ensemble).

J'ai répondu à ces défis de différentes manières, qui m'ont permis d'explorer le couplage des plusieurs solutions à l'intégration de l'espace et du temps dans les réseaux bayésiens.

Dans le modèle géoprospectif de la métropole azurienne (Fusco 2012), le réseau bayésien propose une spatialisation grossière d'un système territorial en quelques sous-espaces clés et le modèle probabiliste est ainsi le modèle des interactions spatiales spécifiques à ces quelques sous-espaces. Ce type de modélisation permet de formaliser les connaissances spécifiques (toujours incertaines) sur l'interaction entre un nombre limité de sous-espaces (par exemple un ou plusieurs centres-villes, leur espace périphérique ainsi que l'espace rural dans lequel ils se situent), mais n'est pas approprié au développement de modèles spatiaux plus génériques.

La solution envisagée pour les boucles d'interaction entre phénomènes est celle des réseaux bayésiens dynamiques. Un premier modèle intègre les relations probabilistes existant parmi les variables territoriales clés pendant une phase d'expansion ou de contraction de l'activité économique nationale (demi-cycle de 3-5 ans). Au sein d'une même phase du cycle économique nous pouvons en effet faire l'hypothèse d'une certaine stabilité en ce qui concerne les phénomènes modélisés (la croissance économique, le chômage, la population, etc. augmentent ou diminuent), ce qui permet d'aboutir à un premier modèle statique : la variable temps n'y intervient pas et les boucles d'interactions en sont exclues. Ce modèle décrit le fonctionnement du système territorial dans une "tranche temporelle" suffisamment courte pour permettre de distinguer, pour le système territorial, des phénomènes moteurs (cars ils sont externes à l'aire d'étude ou relèvent de temporalités plus longues) et des phénomènes dépendants (c'est-à-dire susceptibles d'évoluer sous l'effet des phénomènes moteurs dans un intervalle de 3-5 ans).

Ce modèle statique est le point de départ pour développer un modèle d'évolution du système à plus long terme, intégrant à la fois les boucles d'interaction entre variables territoriales et le lien de certains phénomènes avec la variable temps. Ce modèle utilise le formalisme des réseaux bayésiens dynamiques. Ces derniers implémentent automatiquement la reconduction du modèle construit pour un pas de temps donné (tranche temporelle), en prenant en compte les liens existant entre les variables à ce pas de temps et celles aux pas de temps antérieures. Deux hypothèses sous-tendent le réseau bayésien dynamique :

- l'hypothèse markovienne, stipulant que les variables d'un pas de temps ne dépendent que d'un nombre limité de pas de temps antérieurs (classiquement le pas de temps précédent, hypothèse markovienne du premier ordre, des ordres supérieurs sont nécessaires pour modéliser une dépendance de trajectoire) ;
- la stationnarité des phénomènes, c'est-à-dire l'invariance des paramètres probabilistes du réseau aux différents pas de temps (hypothèse qui peut être partiellement relâchée par l'introduction de la variable temps dans les équations probabilistes).

L'impossibilité d'introduire des boucles d'interaction dans un réseau bayésien statique est ainsi dépassée, du fait que la variable B , dépendant de la variable A au pas de temps t_1 , peut éventuellement influencer la même variable A au temps t_2 , et ainsi de suite, élargissant l'éventail de relations systémiques modélisables.

En ce qui concerne la modélisation des relations spatiales, une autre solution est celle de produire, par le biais d'un réseau bayésien, un modèle de l'interaction de chaque unité spatiale d'un système

territorial avec ses voisins. L'enjeu est ici celui de se focaliser sur le voisinage et sur le type d'interaction spatiale pertinents pour les phénomènes étudiés. Dans l'organisation spatiale des réseaux urbains (Fusco 2010), le réseau bayésien a ainsi intégré la topologie et l'espace-temps des relations hiérarchiques dans des voisinages à géométrie variable (on étudie pour chaque commune les relations avec un certain nombre de centres potentiellement dominants dans son voisinage). La description de ces relations est une étape préalable avant de pouvoir développer un modèle du fonctionnement territorial au cours des dernières décennies décliné pour chaque commune de la région PACA et explorer ensuite un scénario tendanciel dans l'hypothèse de stabilité structurelle des fonctionnements territoriaux. Dans ce travail, comme dans celui des dynamiques socioéconomiques et urbanistiques des communes des trois départements littoraux de la région PACA (Fusco 2008), la dimension temporelle est prise en compte par le couplage de variables statiques (décrivant l'état de l'unité spatiale au temps t_1) et dynamiques (décrivant les variations entre t_1 et t_2). En effet, contrairement au modèle géoprospectif de la métropole azurée (Fusco 2012), ces modèles sont appris à partir de bases de données spatiales possédant une certaine profondeur temporelle. Dans le cas des dynamiques métropolitaines des trois départements littoraux, par exemple, l'identification de relations entre variables statiques et dynamiques permet de modéliser des interactions plus complexes : les accessibilités produites par les réseaux de transports (desserte par les infrastructures, accessibilité aux emplois) sont en fait à mettre en relation avec les caractéristiques du parc de logements des communes et ces dernières influencent lourdement la démographie communale (taux de vieillesse, taille des ménages, etc. et leur changement dans le temps) ; or la démographie communale est également un facteur important dans l'explication des dynamiques du parc de logements, permettant de créer le début d'une boucle d'interaction qui pourrait être successivement exploitée dans le formalisme des réseaux bayésiens dynamiques.

Dans les recherches sur le lien entre forme urbaine et fonctionnements commerciaux (Fusco et al. 2015), l'unité spatiale de l'analyse était le tronçon viaire au sein d'une agglomération urbaine. Ici le modèle bayésien est uniquement statique. L'effort de recherche est sur la formalisation des relations spatiales susceptibles d'expliquer les densités commerciales. La modélisation des propriétés spatiales des tronçons de rue par analyse configurationnelle est ainsi un préalable à toute modélisation bayésienne. Les descripteurs du tronçon de rue appréhendent précisément les caractéristiques spatiales extrinsèques de ce dernier, c'est-à-dire les propriétés spatiales qui lui sont conférées par l'interaction avec toutes les autres unités spatiales dans un voisinage donné. Le modèle bayésien a été développé seulement après, pour identifier les liens probabilistes les plus forts entre paramètres configurationnels et densités commerciales.

Pour terminer cette rapide revue des solutions adoptées, la modélisation des polarisations sociales des communes d'une aire métropolitaine (développée dans le cadre de la thèse de F. Scarella 2014 et repris ensuite dans le projet Géo-Incertitude, voir Section 4.6) utilise un réseau bayésien qui formalise les relations spatiales entre chaque commune et son environnement (les communes limitrophes, les centres métropolitains qui le dominent, etc.) en termes d'influence sur leur valorisation/dévalorisation résidentielle. Le réseau bayésien est ensuite construit par connaissance experte (néanmoins étayé par une analyse quantitative rétrospective des relations observées dans le passé) comme modèle de chaque commune d'une aire métropolitaine (ici celle de Marseille). Encore une fois, les boucles d'interaction sont introduites par le couplage de variables d'état et de variables dynamiques. La valorisation/dévalorisation résidentielle d'une commune et les facteurs susceptibles d'induire son changement sont ainsi mis en système pour expliquer sa variation au cours d'une décennie. Les variations les plus probables prédites à l'issue de la décennie sont ensuite réintroduites au sein d'un SIG pour pouvoir relancer le calcul des nouvelles relations spatiales entre les communes de l'aire

métropolitaine et relancer ainsi une simulation probabiliste pour une nouvelle décennie. Interaction spatiale et dynamiques temporelles sont ainsi introduites de la façon la plus complète par le couplage entre SIG et réseaux bayésiens.

Identifier des « types » et des relations forme-fonctionnement en contexte d'incertitude

Comme déjà remarqué, un des aspects les plus intéressants de la modélisation par les réseaux bayésiens est celui de pouvoir coupler des pré-connaissances du modélisateur avec l'apprentissage à partir de bases de données appropriées. Dans le cadre de mes recherches, les réseaux bayésiens se sont montrés bien adaptés à identifier des relations incertaines au sein de bases de données sur les fonctionnements urbains. Je montrerai dans la suite deux grandes familles d'applications que j'ai développées depuis ma thèse de doctorat : la recherche inductive de relations causales incertaines et celle de regroupements (*clustering*) à base d'incertitude.

Dans les deux cas, l'approche est celle de la découverte de connaissances dans les bases de données. Cependant, il ne s'agit pas de la position relativement naïve adoptée par l'analyse exploratoire des grandes bases de données, selon laquelle on rentrerait des données sans aucune hypothèses théorique. Dans mes recherches, j'assume que l'information est déjà structurée par des pré-connaissances théoriques. Ces dernières se reflètent dans le choix des variables/indicateurs considérés comme étant pertinent (*feature selection*) et encore plus, en ce qui concerne la recherche de relations causales, dans des contraintes aux algorithmes de recherche obligeant les structures à tester des sous-ensembles acceptables de solutions possibles (qui sont, à leur tour, des théories « faibles » assumées par le modélisateur).

Application n°1 : recherche de relations causales incertaines – De l'explication d'une variable cible à l'identification d'un système de relations

Même la recherche de relations causales peut être caractérisée par différents niveaux de complexité. Dans « *Street Network Morphology and Retail Locations* » (Fusco et al. 2015), l'objectif était d'**expliquer les densités commerciales observées** sur les segments viaires de l'agglomération niçoise. J'ai déjà présenté l'apport de ce travail dans le cadre des recherches sur la complexité de la forme urbaine. J'évoquerai ici seulement son apport méthodologique en ce qui concerne le caractère incertain de la relation forme/fonctionnement. L'architecture de la recherche est ici relativement simple, avec une variable à expliquer et un ensemble de possibles facteurs explicatifs. Cette même architecture de recherche aurait pu être implémentée avec des modèles plus classiques de régression multiple ou de réseaux de neurones régressifs. Les réseaux bayésiens ont été employés précisément pour leur plus grande liberté d'association de variables (relations linéaires, non-linéaires et mêmes non fonctionnelles), pour leur capacité à travailler avec des variables discrètes (les densités commerciales ayant été discrétisés en cinq classes de valeurs correspondant à des situations réelles bien différenciées) mais, surtout, pour leur approche probabiliste dans l'identification et dans la caractérisation des relations explicatives.

La recherche de relations explicatives des classes de densité commerciale part d'un ensemble d'hypothèses théoriques relativement faibles : la forme urbaine, et plus particulièrement les caractéristiques configurationnelles de la forme des réseaux, sont susceptibles de jouer un rôle dans l'explication des densités commerciales, comme déjà suggéré par Hillier (1996), Cutini (2001), Porta et al. (2009, 2012). En revanche, nous ne savons pas quel est le rôle respectif des réseaux viaires (supportant le mouvement piéton) et des réseaux routiers (supportant le mouvement automobile), quelles sont les caractéristiques configurationnelles les plus déterminantes (atteignabilité, proximité,

intermédiarité, rectilinéarité moyenne des parcours, etc.) ni quelles sont les échelles les plus pertinentes. De même, nous ne pouvons pas exclure non plus que quelques caractéristiques intrinsèques des segments viaires puissent favoriser ou freiner le développement commercial (largeur de la rue, typologie routière, sens de circulation, vitesse maximale, etc.). Finalement, l'objectif étant l'explication des localisations des petites et moyennes surfaces commerciales, les grandes surfaces étaient également susceptibles de jouer un rôle, par rapport à la configuration des rues, dans la génération d'opportunités d'installation pour les plus petits commerces. 52 300 segments viaires de l'agglomération de Nice ont ainsi été décrits par 52 paramètres configurationnels, 7 descripteurs de caractéristiques intrinsèques ainsi que par leur potentiel de densité commerciale (obtenue comme densité de kernel calculée sur réseau, selon l'approche d'Okabe et Sugihara 2012). Plus de 20 modèles alternatifs ont été considérés, correspondant à des paramétrisations différentes de la recherche des relations explicatives les plus vraisemblables, en connaissant les données.

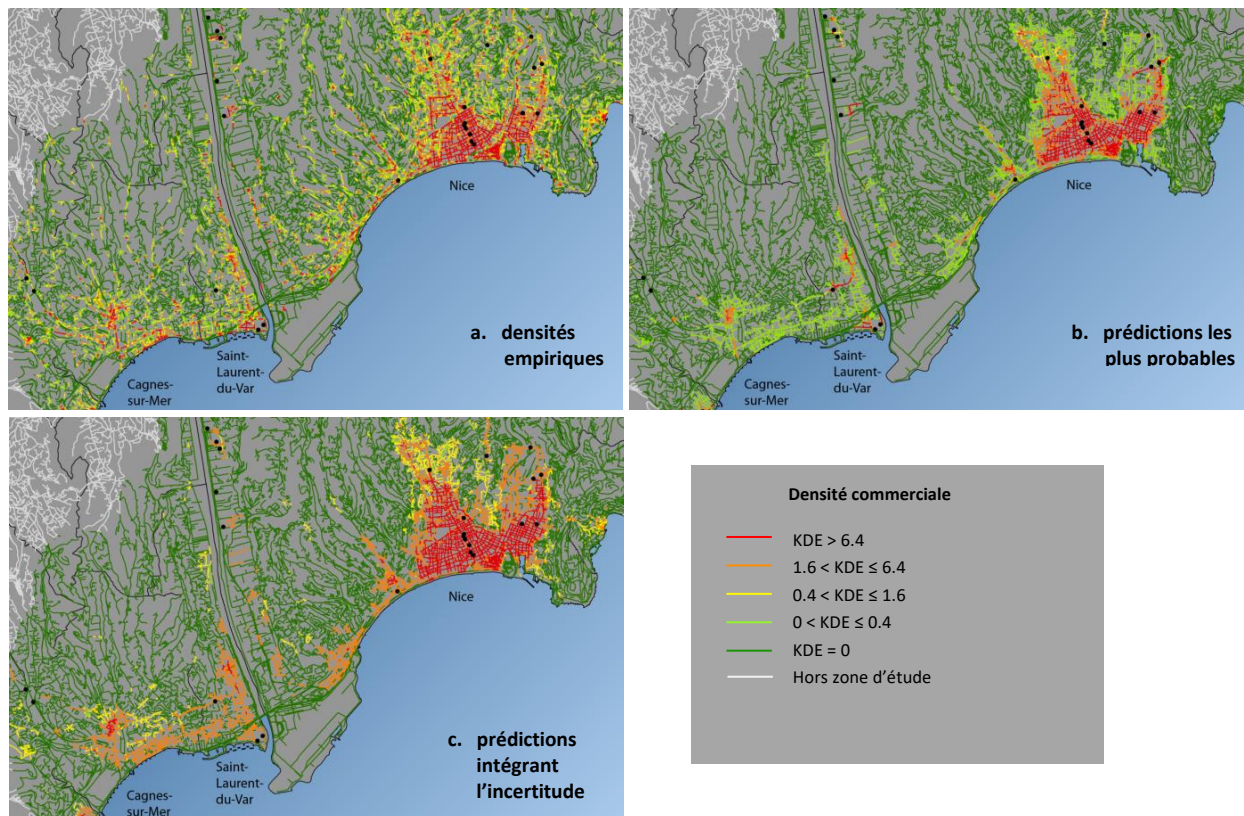


Figure 4.3 – Densités commerciales dans l'aire d'étude et prédictions du modèle bayésien.

Par des procédures de validation croisée par partition aléatoire des données, nous pouvons estimer la capacité prédictive de ces modèles à des valeurs comprises entre 66% et 70% : les modèles peuvent prédire correctement la classe de densité commerciale pour plus de deux tiers des segments de l'aire d'étude. Comme nous avons déjà vu dans la Section 3.7, ces modèles combinent toujours une accessibilité piétonne de micro-échelle (atteignabilité ou proximité), une performance du réseau routier à la méso-échelle et un paramètre d'intermédiarité de méso-échelle (tantôt piétonne, tantôt routière et tantôt par rapport à la localisation des grandes surfaces commerciales). Nous restons ainsi avec une pluralité d'explications possibles, toutes relativement plausibles et en bon accord avec les données empiriques, et une certaine convergence sur le fait que les densités commerciales puissent

être en grand partie expliquées par un mélange de logiques configurationnelles piétonnes et automobiles de micro- et de méso-échelle. Les différents modèles sont tous particulièrement défailants dans l'explication des petites présences commerciales (les segments ayant un seul commerce), se focalisant sur la prédiction des segments sans commerces ou de ceux avec des présences commerciales plus importantes. En ce sens, les prédictions les plus probables des modèles (Figure 4.3 b) sont des filtres passe-bas, identifiant dans l'espace urbain les grandes concentrations commerciales ainsi que les zones d'absence de commerces.

Pour obtenir des prédictions plus attentives à la présence de commerces isolés, nous devons également prendre en compte l'incertitude, exprimé en degré de croyance, de chaque prédiction. Si, lorsque ce degré de croyance est trop faible ($p < 0.4$) nous considérons la valeur attendue au lieu de la valeur la plus probable, nous obtenons une petite dégradation du pouvoir prédictif total des modèles (de l'ordre de 1 ou 2 points de pourcentage), mais nous limitons la magnitude des erreurs de prédiction et nous identifions d'importants sous-espaces urbains où le potentiel commercial, tout en étant réduit, n'est pas pour autant nul (Figure 4.3 c). Seulement les commerces isolés dans l'espace collinaire à la lisière de la ville agglomérée restent relativement mal pris en compte par le modèle, renvoyant à des micro-facteurs locaux non configurationnels (par exemple la réelle disponibilité de locaux commerciaux) qui n'ont pas été intégrés dans les modèles bayésiens.

L'architecture des réseaux bayésiens pour l'explication des densités commerciales reste néanmoins particulièrement simple. Elle correspond à une convergence de relations causales (arc orientés) allant des variables explicatives vers la variable à expliquer. Les algorithmes de recherche automatique de relations probabilistes évitent d'intégrer au modèle les variables pour lesquelles la relation statistique est non significative, dans la métrique bien spécifique de l'information mutuelle¹³ entre variable explicative et variable à expliquer, en connaissant les autres variables explicatives déjà intégrées dans le modèle.

Un objectif beaucoup plus ambitieux est celui d'**identifier un véritable système de relations causales** entre un ensemble de variables décrivant un domaine d'étude au sein duquel nous faisons l'hypothèse que plusieurs mécanismes explicatifs puissent coexister. Identifier un système plausible de relations a été ainsi un des objectifs des recherches sur les dynamiques des réseaux urbains en région PACA (Fusco 2010) et sur les dynamiques socioéconomiques et urbanistiques des communes des trois départements littoraux de la région PACA (Fusco 2008). Avec des approches légèrement différentes, l'apprentissage des réseaux bayésiens dans ces deux recherches est parti par des contraintes fournies par le modélisateur :

- Un ordre des variables devant être respecté par toute relation de cause-à-effet, nécessaire pour l'algorithme K2 (Cooper et Hersovits 1992) dans Fusco (2008).
- Un ordre entre blocs de variables exploré par différents algorithmes dans Fusco (2010).

Les tables de probabilités conditionnelles apprises des données montrent une grande richesse de relations possibles : aux relations causales classiques de type positif ou négatif (selon le sens de la corrélation entre deux variables), se rajoutent des relations en U (d'abord négative, ensuite positives), en U renversé (d'abord positives, ensuite négatives) ou encore non fonctionnelles (par exemple, à des faibles valeurs de la variable parent peuvent correspondre des valeurs faible ou fort, mais pas moyennes, de la variable enfant, du fait de l'intervention de variables secondaires omises dans le modèle.

¹³ L'information mutuelle est une mesure classique de la force de la relation probabiliste entre deux variables, dérivée de la théorie de l'information (MacKay 2003).

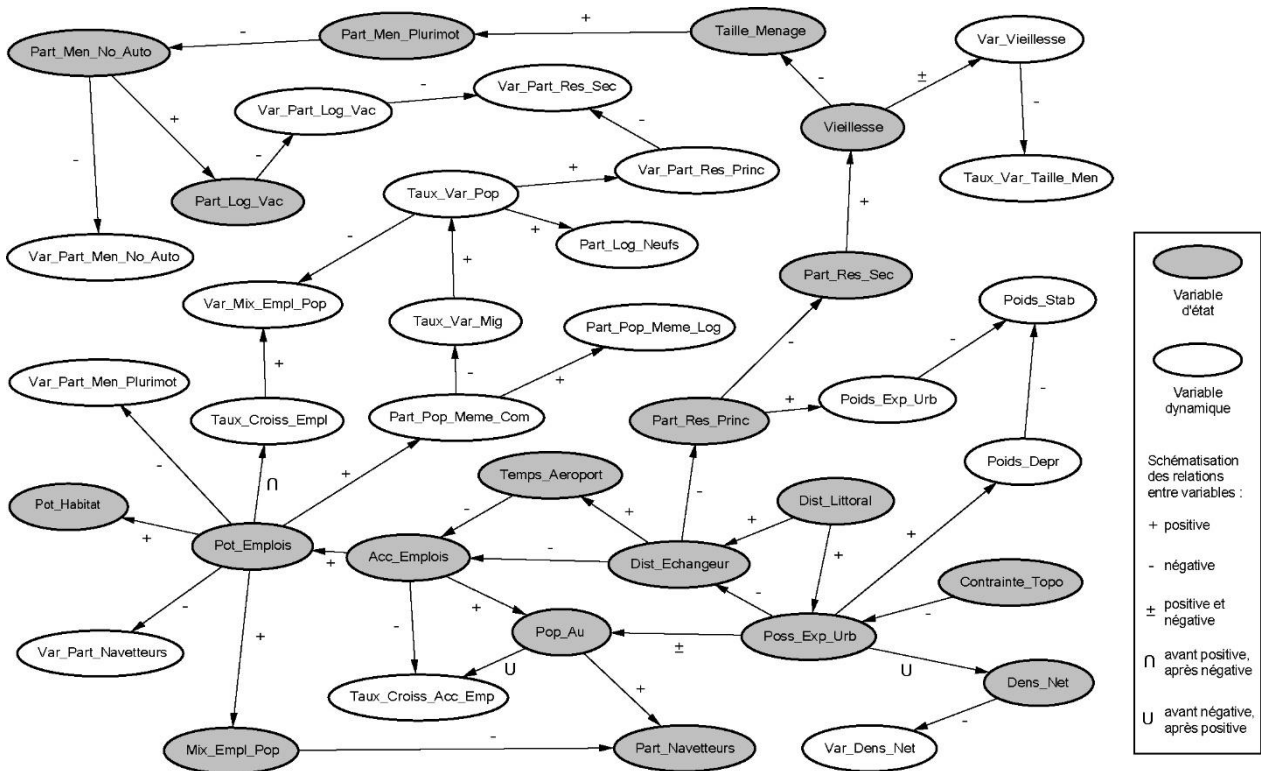


Figure 4.4 - Réseau bayésien des dynamiques territoriales des communes des départements littoraux de PACA.

Ces modèles appris des données ont également fait l'objet d'un grand nombre de procédures de validation et d'évaluation : validation croisée des structures pour identifier les relations probabilistes les plus robustes, validation croisée du pouvoir prédictif sur chaque variable du modèle, identification des sous-espaces les mieux décrits par les relations probabilistes du modèle et, *a contrario*, des sous-espaces caractérisés par des combinaisons de valeurs particulièrement improbables selon le modèle (sous-espaces aux fortes spécificités locales, constituant des écarts au modèle général de l'aire d'étude), etc. Ces procédures, basées sur le rééchantillonnage des données et sur la comparaison des différents modèles produits, montrent encore une fois le potentiel d'une démarche probabiliste bayésienne dans l'identification de systèmes de relations entre variables en présence d'une opportune base de données.

Bien évidemment, l'interprétation causale des relations probabilistes apprises dans la génération d'un réseau bayésien à partir de données ne va pas de soi. Selon Druzdzel et Simon (1993), un réseau bayésien constitue un réseau de relations de cause-à-effet si et seulement si les deux conditions suivantes sont respectées :

- 1) l'ensemble de chaque nœud avec les liens à ses parents directs représente un mécanisme différent opérant dans le système réel ;
- 2) chaque nœud sans prédécesseurs représente une variable exogène pour le système.

Une phase de vérification des résultats du processus de découverte de connaissances est par conséquent toujours nécessaire avant d'accepter le réseau bayésien trouvé comme modèle représentatif de structures causales réelles.

Application n°2 : la recherche inductive de patterns par le clustering multivarié bayésien

Dans d'autres contextes de recherche, l'identification d'un système de relations causales entre les variables d'un système complexe peut être hors de portée pour le géographe modélisateur. Ses hypothèses théoriques peuvent être trop lacunaires et/ou trop faibles, tout comme ses capacités à vérifier le caractère causal des relations probabilistes trouvées. D'autres approches d'apprentissages dans les bases de données peuvent se relever plus pertinents pour cet état de connaissance, notamment celui du clustering multivarié. De manière générale, l'objectif du clustering multivarié est celui d'identifier des structures d'associations récurrentes entre les variables descriptives d'un objet (appréhendé en tant que système complexe), permettant de regrouper plusieurs objets dans des groupes (clusters) bien différenciés correspondant à une typologie de ces objets. A la différence d'une classification, qui présuppose la connaissance préalable des types auxquels attribuer les objets, dans la démarche de clustering les caractéristiques (et souvent même le nombre) des groupes sont *a priori* inconnus et doivent être découvertes dans les données. Cela permet au clustering multivarié d'être utilisé avec des objectifs de recherche différents (Halkidi et al. 2001) :

- La réduction des données : regrouper des nombreux objets d'étude au sein d'une base de données massives dans un nombre limité de groupes permet de réduire considérablement la quantité d'information à stocker.
- La génération d'hypothèses : dans une approche de fouille de données relativement peu structurée, étudier les caractéristiques qui régissent le regroupement des objets permet de formuler des hypothèses sur les relations existant entre les variables de l'analyse et d'étudier la complexité de ces associations de façon plus inductive. Ces hypothèses devront successivement être étayées par d'autres approches (cas d'étude, analyses quantitatives sur d'autres corpus de données, etc.).
- Le test d'hypothèses : des hypothèses théoriques, même partielles et contradictoires, peuvent structurer une attentive sélection de variables (*feature selection*), les logiques des regroupement trouvés peuvent venir confirmer/infirmer ces hypothèses ou arbitrer entre plusieurs hypothèses. Clairement il s'agit d'une démarche plus souple et moins tranchante que celle du test d'hypothèses par l'identification de relations causales : le chercher n'avance pas d'hypothèses fortes sur le type de relations régissant les variables.
- La prédiction basée sur des regroupements : même en l'absence d'un modèle explicatif des relations entre les variables, les regroupements peuvent servir pour inférer les valeurs de certaines variables non observées en connaissant l'appartenance d'un objet à un groupe donné (appartenance identifiée grâce aux variables connues).

En analyse spatiale, les objets du clustering multivarié sont normalement des unités spatiales au sein d'un espace d'étude. Les démarches de clustering peuvent alors intégrer ou non la dimension spatiale du voisinage entre ces unités. Dans le premier cas, nous abordons un problème de clustering dual (Lin et al. 2005) : les unités spatiales doivent être proches à la fois dans l'espace des variables et dans l'espace géographique, une contrainte relativement forte qui peut se justifier dans certains contextes de recherche. Dans le second cas, un des objectifs du clustering est précisément de vérifier dans quelle mesure les regroupements des unités spatiales, sous la seule contrainte de la proximité dans l'espace des variables, aboutissent à une régionalisation de l'espace géographique, avec la délimitation de plus vastes sous-espaces regroupant spatialement des unités appartenant au même cluster.

Dans ces différents contextes de recherche, l'approche bayésienne peut venir en aide à une démarche de clustering, en y rajoutant également une prise en compte probabiliste de l'assignation des objets aux différents groupes.

Il y a plusieurs modalités d'utilisation des réseaux bayésiens pour parvenir à un clustering probabiliste d'objets (pour nous, des unités spatiales) décrits par une pluralité de variables. La façon la plus simple est celle d'imposer la structure particulièrement simple du classificateur bayésien naïf (Duda et Hart 1973). Il s'agit d'une structure étoilée où la variable qualitative du cluster d'appartenance, non observable, est la variable explicative de toutes les variables observées. Dans ce réseau, chaque variable devient indépendante des autres conditionnellement à la connaissance de la variable cluster, d'où le nom « naïf » donné à ce modèle. Les algorithmes d'apprentissage bayésien des paramètres du réseau se basent sur une approche dite espérance-maximisation (EM, Dempster et al. 1977) : on initialise les paramètres, on impute les objets aux clusters les plus probables et on recalcule les paramètres les plus vraisemblables étant données ces appartenances, on itère ce processus jusqu'à la convergence des paramètres. En utilisant un score couplant vraisemblance et pénalisation pour la numérosité des paramètres à estimer, les algorithmes d'apprentissage bayésien peuvent également identifier le nombre optimal de clusters dans la base de données.

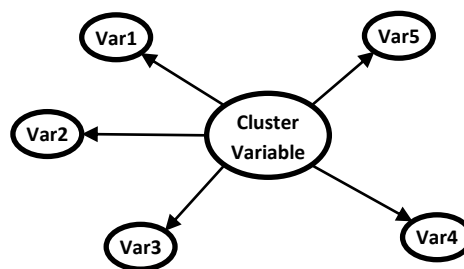


Figure 4.5 - Structure d'un classificateur bayésien naïf.

Le clustering bayésien est probabiliste et identifie des groupes partageant des caractéristiques communes

La principale différence du clustering multivarié bayésien par rapport aux algorithmes classiques de la statistique multivariée (notamment celui des nuées dynamiques, mais également ceux implémentés par l'approche connexionniste des cartes auto-adaptatives, Kohonen 1989) est que ces derniers ont comme objectif d'identifier des clusters homogènes, à partir d'une fonction de distance multivariée des individus aux centres des clusters (quelle que soit leur définition). La minimisation de la fonction de distance force les individus appartenant à un même cluster à avoir des valeurs les plus proches possibles sur l'ensemble des variables de l'analyse. Les algorithmes bayésiens d'EM, en revanche, maximisent la vraisemblance de l'attribution des individus aux clusters, en connaissant les données empiriques. Or, pour maximiser le pouvoir prédictif probabiliste, cette attribution peut se faire sur la base de quelques variables uniquement. Un cluster bayésien est alors caractérisé par le fait que ses membres possèdent tous des valeurs particulières sur un sous-ensemble de variables (et ces variables peuvent différer d'un cluster à l'autre). **L'approche des caractéristiques clés communes par rapport à celui de l'homogénéité des valeurs s'est montrée particulièrement apte à capter la complexité des relations existant entre les variables de systèmes géographiques complexes** dans le cadre de mes recherches. L'homogénéité présuppose en effet, d'un point de vue géométrique, la

convexité des regroupements des points dans l'espace multidimensionnel de l'analyse, une hypothèse extrêmement forte et rarement remise en discussion dans les approches classiques au clustering multivarié en géographie.

Finalement, les réseaux bayésiens ont l'avantage de l'approche probabiliste bayésienne pour rendre compte des incertitudes du clustering. En connaissant les données empiriques (et même en ne les connaissant pas de façon exhaustive si la base de données est lacunaire), les réseaux bayésiens peuvent calculer les clusters les plus probables (à la fois en nombre et en contenu). Des procédures de validation croisée par rééchantillonnage des données et d'analyse de sensibilité par rajout/suppression d'une variable, peuvent être employées pour évaluer la robustesse des résultats du clustering. En même temps, toujours dans un cadre probabiliste, on peut étudier l'association de chaque variable à l'ensemble des clusters et à chaque cluster particulier en termes d'information mutuelle. Même l'affectation d'un individu particulier (pour nous une unité spatiale) à un cluster est fait en probabilité. On peut ainsi évaluer l'incertitude de l'attribution de chaque individu aux clusters et, en les projetant dans l'espace, identifier éventuellement des sous-espaces qui se situent entre les profils typiques des clusters.

J'ai notamment employé le **clustering bayésien** par architecture naïve **pour l'identification de types de tissus urbains** dans l'aire métropolitaine azurée, dans le cadre de la méthodologie MFA (*Multiple Fabric Assessment*, Fusco et Araldi 2017a, Araldi et Fusco 2017, cfr. Section 3.2).

Une phase très rigoureuse de sélection des variables de l'analyse (*feature selection*), basée sur la théorie de la morphologie urbaine (Conzen 1960, 2004, Caniggia et Maffei 1979, Borie et Denieul 1984), permet de négliger les redondances possibles entre les 21 indicateurs morphologiques décrivant chaque unité spatiale. Cette recherche propose en revanche une solution méthodologique très particulière au problème du dual clustering. Les unités spatiales de l'analyse sont en effet des bandes de proximité autour des segments viaires d'une aire métropolitaine (environs 100 000 pour l'aire métropolitaine azurée). Or l'objectif de l'analyse est l'identification de types de tissus urbains et non simplement une typologie d'unités spatiales. Le tissu urbain (voir Section 3.2) est en effet défini par la répétition de relations spécifiques entre les indicateurs morphologiques sur un ensemble interconnecté de rues : une dimension de clustering spatial doit être intégrée à l'analyse. C'est pour cette raison que la méthodologie MFA procède d'abord par une phase de clustering spatial monovarié sur chacun des indicateurs morphologiques (par l'approche des indicateurs d'association locale à contrainte de réseau, LINCS, Yamada et Thill 2007, 2010) et seulement ensuite opère un clustering bayésien sur l'appartenance de chaque unité aux structures de ces clusterings spatiaux (ayant pour résultats les catégories usitées *High-High*, *Low-Low*, *Low-High*, *High-Low* et *Not-Significant*).

La Figure 4.6 montre toute la différence entre le clustering spatial et bayésien des tissus urbains selon la méthode MFA et le clustering équivalent, avec même nombre de clusters, des segments viaires décrits individuellement par les indicateurs morphologiques, sans prise en compte des relations spatiales de voisinage définies par la connexité des rues. Le clustering MFA est ainsi capable d'identifier des régions morphologiques, structures spatiales de méso-échelle correspondant à des sous-espaces urbains où le paysage urbain observable est caractérisé de façon ininterrompue par un tissu urbain particulier ou, plus rarement, par l'alternance de deux-trois tissus (comme c'est le cas, dans cette image, pour la technopole de Sophia Antipolis). Projetée dans l'espace géographique, la typologie des segments viaires pris individuellement produit une mosaïque d'appartenances qui n'est même pas en mesure d'identifier les structures de micro-échelle qui sont les tissus urbains.

J'ai déjà souligné la robustesse de la solution à neuf clusters dans la recherche des types de tissus urbains de la métropole azurée (Section 3.2), chaque cluster correspondant à une grande famille

de tissus urbains. La prise en compte des probabilités d'assignation de chaque unité spatiale à un tissu urbain particulier est également porteuse d'information. Pour 62% des segments viaires de l'aire d'étude, l'incertitude dans l'attribution au cluster le plus probable est en effet négligeable ($< 0,02$), mais pour 35% elle est comprise entre 0,02 et 0,39 et pour 5% elle est même supérieure à 0,39. Projetées dans l'espace géographique, ces unités spatiales identifient à la fois des tissus moins typiques, mélangeant les caractéristiques de plus d'une grande famille, soit les espaces d'interface entre différentes régions morphologiques, où deux ou trois types de tissus s'interpénètrent sur quelques segments viaires.

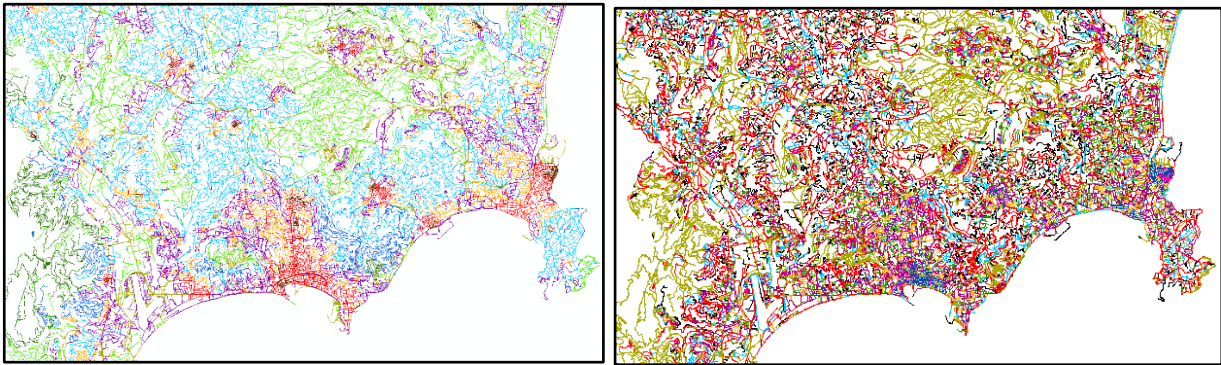


Figure 4.6 - Clustering spatial et bayésien des tissus urbains (MFA) vs. Clustering bayésien des segments viaires.

Les implications en termes d'incertitude du clustering bayésien ont été mieux examinées dans l'étude de la morphologie sociale de la métropole azuréenne (Fusco et Cao, 2016). L'analyse de la spécialisation sociale dans l'espace urbain part traditionnellement de l'identification préalable de populations cible, pour lesquelles des indicateurs de ségrégation sont ensuite calculés (Apparicio 2000, Scarella 2014). Notre recherche a en revanche opté pour une approche *bottom-up* à base d'incertitude : nous ne savons pas quelles populations s'opposent spatialement dans l'espace métropolitain et nous utilisons une base de données décrivant les ménages (ici l'enquête ménages-déplacements de 2008) pour identifier de façon inductive les principales oppositions spatiales. L'hypothèse de départ et que les différences de revenus ne sont pas le seul facteur de spécialisation sociale des espaces. Un échantillon de 7539 ménages, représentatif de la population de 94 secteurs de la bande littorale métropolitaine, a ainsi été étudié par le biais de 16 variables décrivant le statut social, la structure du ménage, sa démographie en classes d'âges et l'insertion de ses membres dans la vie active. En introduisant le secteur de résidence comme variable qualitative, une architecture bayésienne naïve a été employée pour identifier des clusters intégrant les similitudes dans l'espace de variables et les différenciations dans la localisation résidentielle. Une analyse de sensibilité a été conduite sur les contraintes au clustering, surtout en ce qui concerne le poids du lieu de résidence, pour éviter les problèmes de surapprentissage. La solution optimale a été identifiée en imposant un minimum de 4% des ménages dans chaque cluster et un poids pour la variable qualitative spatiale qui est le double de celui des descripteurs des ménages. Avec ces paramètres, le secteur de résidence est seulement la quatrième variable en termes d'information mutuelle avec les onze clusters identifiés et le clustering résume 36,4% du contenu informationnel de l'ensemble des 17 variables. À proprement parler, il ne s'agit pas d'une approche de clustering dual : nous recherchons des regroupements de ménages (et pas d'unités spatiales), mais nous prenons en compte le fait que ces ménages habitent dans un même secteur, en complément de leur similitude sur les autres descripteurs.

4. Méthodologies de la connaissance incertaine sur la ville

Les ménages peuvent avoir des probabilités non nulles d'être attribués à plusieurs clusters. En passant de l'échantillon à la population totale des ménages de l'aire métropolitaine, des nouvelles incertitudes sont introduites. Finalement, la description des clusters ne peut que se faire de façon probabiliste : chaque cluster est caractérisé par des associations probabilistes, plus ou moins fortes, entre caractéristiques sociodémographiques et lieu de résidence. La spécialisation sociale des secteurs métropolitains est évaluée par l'indice classique de dissimilarité de Duncan et Duncan (1955), mais l'on peut trouver des valeurs différentes de cet indice par rapport au niveau d'incertitude que l'on est prêt à accepter dans nos connaissances des spécialisations.

Il est essentiel de pouvoir bien représenter et communiquer les niveaux d'incertitude associés aux résultats obtenus. La communication graphique et cartographique de la connaissance incertaine est un enjeu crucial pour le géographe. Or, les cartes communément produites donnent une fausse impression de connaissance certaine, même lorsque les données présentées sont issues de modélisations sophistiquées. Plusieurs auteurs ont ainsi proposé des approches de représentation graphique d'informations incertaines (MacEachren 1992, MacEachren and Howard 1993, Ehlschlaeger et al. 1997, Cedelnik and Rheingans 2000, Ward 2002). Nous avons opté pour une géovisualisation interactive des résultats incertains du modèle de clustering (Cao et Fusco 2016a). Un système de tableaux de bords permet de lier interactivement des cartes, des diagrammes et des textes, qui se modifient par rapport au niveau d'incertitude, choisi par le lecteur, des informations représentées. Je montrerai les principales caractéristiques de notre solution par quelques représentations graphiques dans les figures suivantes.

La Figure 4.7 fournit une description probabiliste du contenu des clusters bayésiens des ménages. Cinq clusters concernent des couples d'actifs avec enfants et diffèrent en termes de statut social, deux clusters les couples de retraités, deux autres clusters les retraités seuls et un dernier cluster les ménages monoparentales en difficulté socioéconomique. Ce dernier, sans surprise, est le plus ségrégué d'un point de vue spatial, avec un indice de dissimilarité de 0,75, car concentré dans un nombre limité de secteurs métropolitains. L'exploration des valeurs probabilistes des différentes variables est clairement bien plus riche que cette présentation succincte et le lecteur peut saisir les incertitudes dans la définition des clusters en termes de probabilités qu'une certaine caractéristique soit associée aux ménages de chaque cluster.

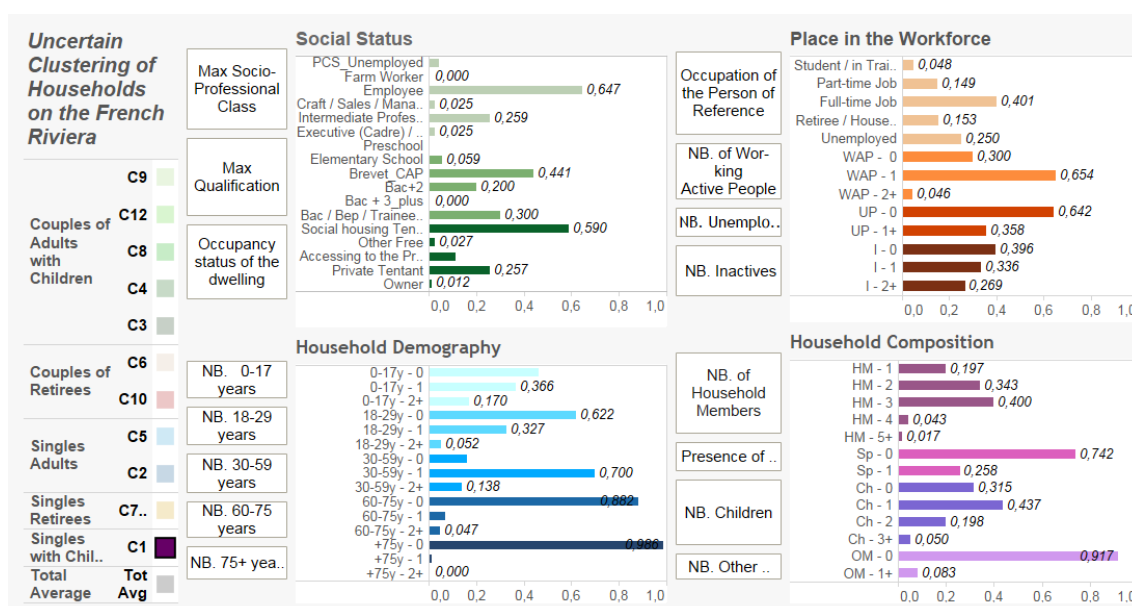


Figure 4.7 – Description probabiliste des clusters de ménages dans l'aire métropolitaine azurée.

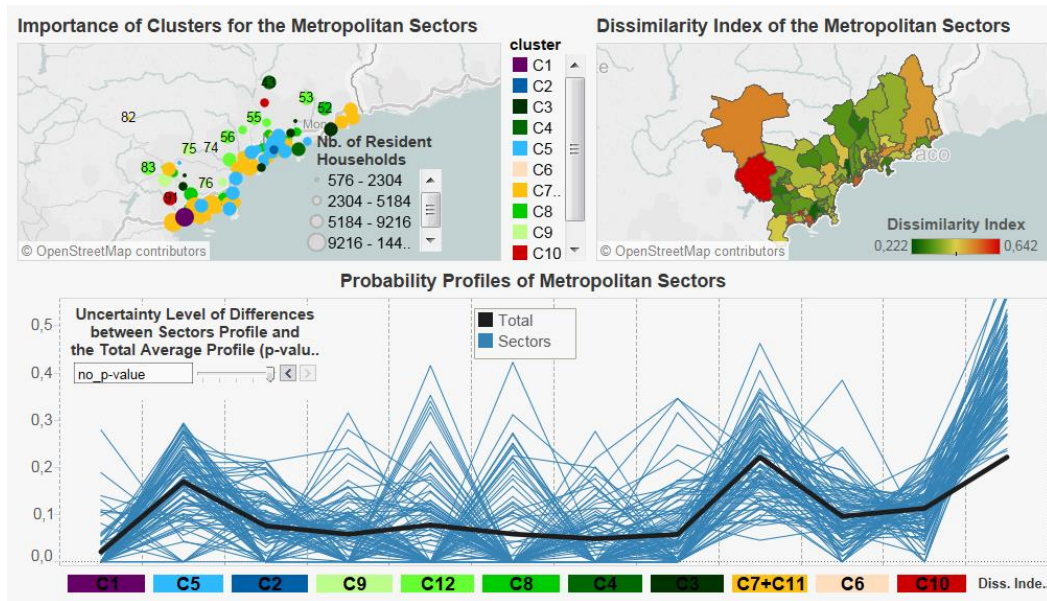


Figure 4.8 – Contenu sociodémographique des secteurs métropolitains.

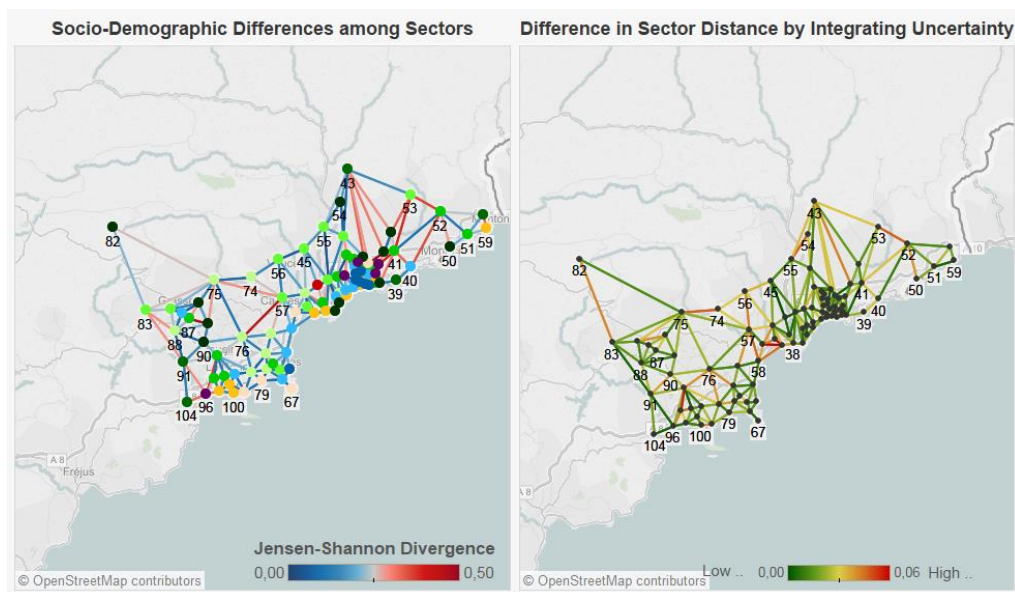


Figure 4.9 - Oppositions socio-spatiales entre secteurs métropolitains voisins.

La Figure 4.8 représente par le biais de cartes et de diagrammes le contenu sociodémographique des secteurs de la métropole. Les clusters des ménages sont différemment distribués dans l'espace et chaque secteur a un profil de probabilité que ses ménages appartiennent aux différents clusters. Certains clusters peuvent être particulièrement informatifs pour chaque secteur : le cluster modal, le plus surreprésenté, le plus sous-représenté et le plus caractéristique (avec le quotient de localisation plus élevé par rapport à la moyenne métropolitaine).

Finalement les indices de dissimilarité mesurent la proportion de la population du secteur qui devrait déménager pour atteindre la même distribution de probabilité que dans l'ensemble de la métropole. L'incertitude du contenu sociodémographiques des secteurs peut être exploré dans la visualisation. Elle dérive à la fois de l'assignation incertaine des ménages aux clusters et de l'échantillonnage. La significativité des écarts au profil moyen de la métropole est évaluée par rapport

4. Méthodologies de la connaissance incertaine sur la ville

à l'hypothèse nulle que le pourcentage d'un cluster donné dans chaque secteur dérive d'une distribution binomiale dont l'espérance mathématique est la valeur moyenne métropolitaine. Dans la géovisualisation le niveau de significativité est choisi par le lecteur : en demandant davantage de certitude aux connaissances, les différences non significatives sont omises.

Les contrastes socio-spatiaux entre secteurs métropolitains contigus sont représentés dans la Figure 4.9. Les contenus sociodémographiques des secteurs étant connus en probabilité, les différences sont mesurées en termes de divergence. Plus particulièrement, la divergence de Jensen-Shannon (Lin 1991) a été utilisée pour ses avantages d'être symétrique et définie même quand certains clusters sont absents dans un secteur donné. Encore une fois, les incertitudes des contenus sociodémographiques peuvent produire différents niveaux de contrastes socio-spatiaux, selon le niveau de significativité des écarts au profil métropolitain. Le lecteur peut apprécier les contrastes qui sont identifiés avec les plus bas niveaux d'incertitude, comme ceux à l'intérieur de la ville de Nice.

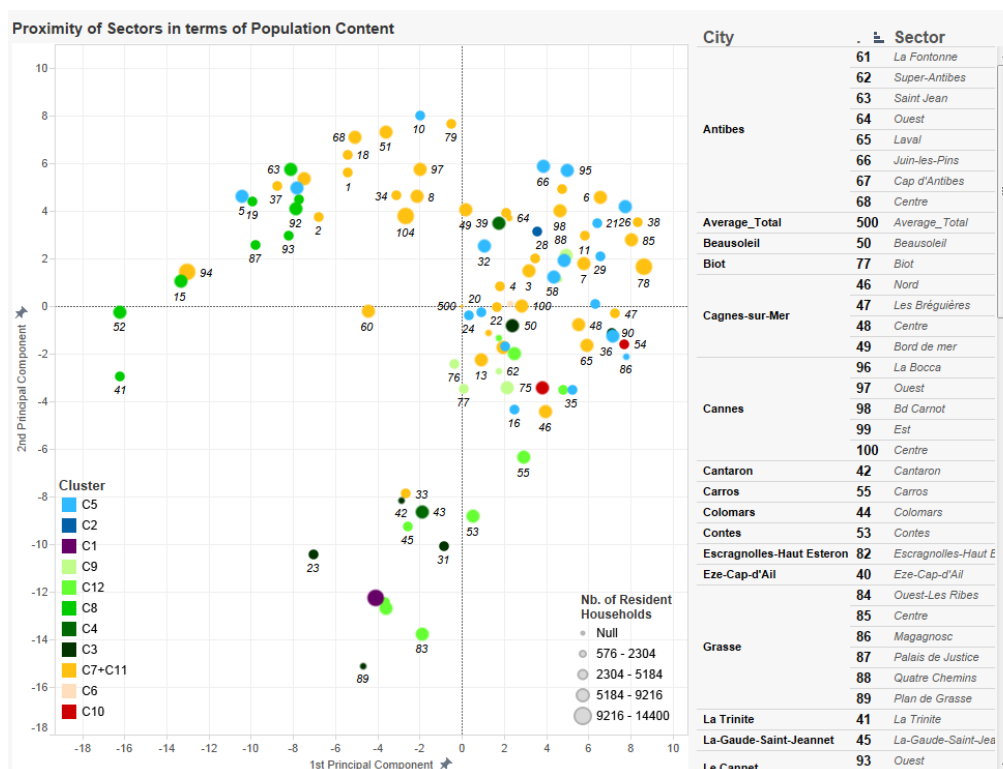


Figure 4.10 - Proximité des secteurs métropolitains dans l'espace des variables.

La Figure 4.10 représente la proximité des secteurs métropolitains dans l'espace des variables. Les divergences de Jensen-Shannon définissent une matrice de distance entre les secteurs. Les axes d'une analyse en composantes principales peuvent alors être utilisés pour visualiser la proximité/éloignement entre les secteurs en termes de contenu sociodémographique et la comparer à l'appartenance communale des secteurs. Encore une fois, en réduisant les niveaux d'incertitude par des seuils de significativité, on peut modifier les résultats de l'analyse. En variant ces niveaux, on peut par exemple apprécier la diversité saillante des secteurs de la ville de Nice, que l'on ne retrouve pas dans les autres grandes villes de la métropole (Cannes, Antibes).

En conclusion, par l'exemple de la métropole azurienne, nous avons montré que la connaissance de la morphologie sociale de l'espace résidentiel est incertaine. Dans ce contexte, au lieu de définir α

priori des populations cible, les techniques de clustering incertain, notamment bayésien, peuvent être utilisées pour identifier les plus importantes oppositions socio-spatiales dans une aire métropolitaine. Des géo-visualisations interactives peuvent ensuite être développées pour mieux saisir les résultats du clustering.

L'approche plus sophistiquée du clustering bayésien hiérarchisé a comme objectifs de réduire la multi-dimensionalité de la base de données, en évitant d'aplatir l'apprentissage sur un groupe de variables fortement corrélées, et de découvrir des facteurs latents, non observables, dont les variables observées ne seraient qu'une manifestation empirique. Le clustering bayésien hiérarchisé passe par une étape préalable d'apprentissage non-supervisé du plus probable graphe orienté acyclique entre les variables. Les relations ainsi trouvées ne doivent pas forcément être interprétées en tant que relations causales régissant le système étudié. Il s'agit d'un système de relations probabiliste qui définit néanmoins une distance informationnelle entre les variables en termes d'information mutuelle.

Une première application de clustering relativement conventionnelle (l'approche classique de minimisation de la variance intra-groupe peut être retenue) revient alors à regrouper les variables originales par rapport à leur distance informationnelle. Il devient ainsi possible de générer un facteur latent en créant une nouvelle variable non observable pour chaque cluster de variables. En utilisant maintenant une structure bayésienne naïve, nous pouvons résumer l'information contenue dans chaque groupe de variables par un facteur latent. Ces facteurs latents peuvent être interprétés en tant que concepts plus généraux, sous-jacents aux variables empiriques, comme dans les analyses factorielles classiques. Pour parvenir au clustering final des objets étudiés sur l'ensemble des variables, une nouvelle variable non observable, celle du cluster multivarié final, est rajoutée dans une architecture naïve contenant les seuls facteurs latents. Cette procédure multi-étapes (résumée dans la Figure 4.11) revient à créer un réseau bayésien hiérarchique où le nœud cluster multivarié est la variable explicative de tous les facteurs et chaque facteur est connecté aux variables empiriques observables dont il est, lui aussi, la seule variable explicative. Au final, l'inférence bayésienne entre variables empiriques et clusters multivariés peut être utilisée pour caractériser ces derniers directement en fonction des variables observées.

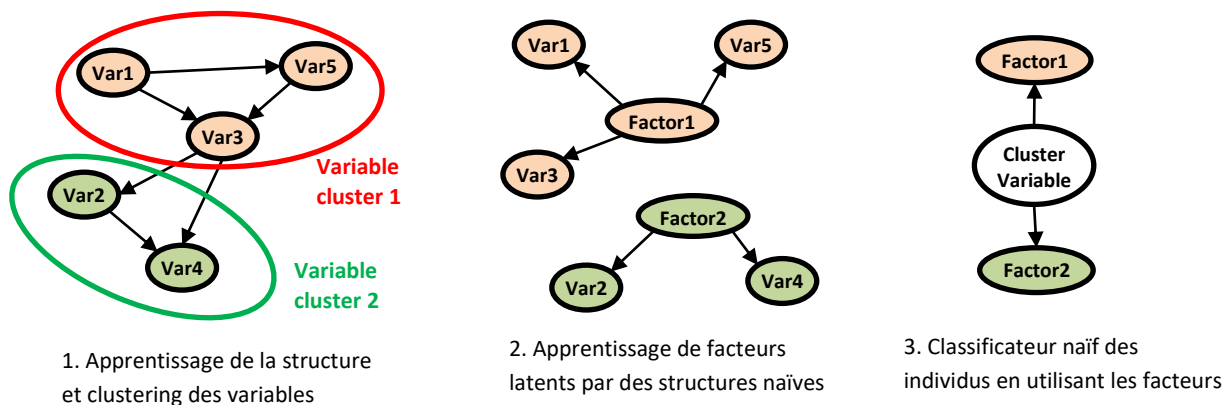


Figure 4.11 – Couplage de l'apprentissage non supervisé avec des structures naïves pour le clustering.

Dans mes recherches en géographie urbaine, j'ai employé cette procédure de clustering multivarié bayésien à trois reprises. D'abord dans l'identification de profils sociogéographiques des accédants à la propriété dans les aires métropolitaines provençale et azurénne (Fusco et Scarella 2012, 2014), ensuite dans celle des types d'affordance spatiale et des régimes d'habiter dans l'aire métropolitaine azurénne (Fusco 2016) et finalement dans la recherche de structures spatiales liant les processus

d'urbanisation, de modernisation sociodémographique et de développement économiques en Inde (Fusco et Perez 2018). Les deux premières recherches ont déjà été présentées, en ce qui concerne leurs résultats, dans la Section 3.7. Nous insisterons ici sur les aspects plus méthodologiques de ces recherches.

L'identification des profils sociogéographiques des accédants à la propriété dans les aires métropolitaines provençale et azurée a été la première application, exploratoire, de la méthode, sur deux échantillons relativement réduits d'individus : 59 ménages dans l'aire métropolitaine provençale et 54 dans celle azurée. Les incertitudes liées à ces faibles échantillons n'ont pas permis d'extrapoler les probabilités marginales des clusters calculées sur les échantillons à l'ensemble des populations cibles (plusieurs dizaines de milliers de ménages ayant acquis leur logement au cours de la période couverte par l'étude dans chacune des deux aires métropolitaines). Les fortes correspondances entre les différents facteurs latents et, finalement, les cinq profils sociogéographiques des accédants à la propriété dans la métropole provençale avec les six profils identifiés sur la Côte d'Azur, pointent en revanche vers une certaine robustesse qualitative des résultats. Surtout, les résultats n'auraient pas pu être obtenus avec les techniques multivariées plus traditionnelles comme dans Aero (2006), Debusschere (2006) and Skifter Andersen (2011), pour rester dans le domaine de cette recherche. Le protocole de clustering hiérarchique bayésien peut plus particulièrement être comparé à une analyse en composantes principales (pour identifier des facteurs latents), suivie d'un clustering multivarié sur les facteurs (nuées dynamiques ou clustering ascendant hiérarchique). Or ces techniques requièrent des structures quantitatives de données, tandis que les variables renseignées dans les entretiens avec les accédants à la propriété étaient essentiellement qualitatives. Seulement les statistiques textuelles (Lebart et al., 1998) pourraient dépasser le clustering bayésien dans la prise en compte du contenu qualitatif des textes d'entretien. Le clustering bayésien possède en tous cas les avantages d'une réduction plus contrôlée des variables de l'analyse, de l'interprétation plus aisée des facteurs latents (ils résument des sous-ensembles disjoints des variables de l'analyse et ne sont pas des combinaisons linéaires de ces dernières) et de l'évaluation de l'incertitude associée à l'attribution de chaque individu à un cluster.

L'intérêt de la démarche était en tous cas celle d'explorer des approches alternatives à l'analyse classique de discours (Renkema 2004), en identifiant par une approche bayésienne des ménages typiques, pour lesquels la probabilité d'attribution à un profil sociogéographique donné était extrêmement élevée, et des ménages moins typiques, pouvant émerger avec des probabilités non négligeables aux différents types. L'analyse de discours aurait par la suite permis de saisir de façon plus détaillée les logiques propres à chaque profil. Il s'agissait d'un essai pour rendre plus inductive la démarche des idéaux-types proposée par Max Weber (1922) dans la démarche en sciences sociales. La démarche n'était cependant pas complètement inductive : un certain nombre d'hypothèses théoriques avait été formulées, notamment la possibilité que des logiques autres que celles strictement utilitaristes (normalement postulées par la science économique) pouvaient être à l'œuvre, notamment celles liées aux dimensions qualitatives du style de vie et aux principes de la distinction sociale proposés par Bourdieu (1979), ainsi que le fait que l'inscription spatiale des trajectoires résidentielles des ménages pouvait être rendue lisible par une double description spatiale aux échelles locale (celle du type d'habitat) et métropolitaine (celle de la distance-temps aux multiples centralités métropolitaines des deux aires d'étude). Dans la mesure où les clusters identifiés proposaient une pluralité de logiques dans la motivation de l'accession à la propriété et que les deux dimensions spatiales des trajectoires résidentielles jouaient un rôle déterminant dans la composition de la plupart des clusters, nous en avons déduit une confirmation (toujours partielle) de nos hypothèses théoriques, en dépit des fortes incertitudes caractérisant le caractère exploratoire de la recherche.

Le clustering des types d'affordance spatiale et des régimes d'habiter des 105 secteurs de l'aire métropolitaine azurée ne dispose pas, à première vue, d'une base de données beaucoup plus grande. Cependant, le clustering s'effectue sur des unités spatiales qui sont exhaustives de l'aire d'étude et qui n'en représentent pas un échantillon. La motivation de cette recherche était encore plus fortement dans la formulation d'un certain nombre d'hypothèses théoriques. Je souhaitais élargir la vision un peu étriquée d'un certain type de recherches sur le lien entre formes urbaines et comportement de mobilité des habitants, en formulant le concept d'affordance spatiale et en employant celui de régime d'habiter (comme style de vie prédominant dans un territoire donné), déjà proposé par Stock (2004). Deux clusterings multivariés bayésiens ont ainsi été conduits sur deux sous-ensembles de variables sélectionnées par leur capacité à rendre compte, collectivement, des différentes facettes des concepts bien plus complexes d'affordance spatiale et de régime d'habiter. Aucune contrainte spatiale n'a été introduite dans les démarches de clustering même si, en ce qui concerne l'affordance spatiale, trois indicateurs de position dans l'espace métropolitain étaient inclus (indicateurs de centralité en semaine et en week-end et indicateur de position par rapport au littoral, ce dernier étant un facteur structurant de l'urbanisation azurée). Le clustering hiérarchique bayésien a ainsi identifié sept typologies d'affordance spatiale et sept différents régimes d'habiter dans l'espace métropolitain azurée (voir Section 3.7). Les plus faibles probabilités d'attribution de quelques unités spatiales aux différents profils identifiés ont également permis de mettre en évidence des possibles situations de transition entre ces types. Dans les deux cas, le clustering dans l'espace des variables a également produit des régionalisations reconnaissables de l'espace métropolitain azurée, avec cependant une surprenante hétérogénéité du moyen-pays et de la bande péri-littorale en ce qui concerne les régimes d'habiter.

L'analyse bayésienne s'est ensuite attaquée à la relation pouvant exister entre l'appartenance de chaque secteur métropolitain aux différents profils d'affordance spatiale et de régime d'habiter. Cette analyse croisée a montré que toutes les combinaisons entre affordances spatiales et régimes d'habiter ne sont pas possibles, mais que des relations strictement déterministes entre les deux concepts sont également à écarter. Les correspondances multiples, les relations préférentielles et les exclusions mutuelles identifiées permettent de conforter le concept de congruence entre phénomènes, déjà proposé par Offner (1993) dans l'étude des systèmes socio-spatiaux appréhendés dans leur complexité : affordances spatiales et styles de vie prédominants s'impliquent mutuellement dans des fonctionnements territoriaux qui doivent faire l'objet de recherches plus ciblées, mais dont les résultats sont déjà identifiables par nos analyses. Par rapport à notre hypothèse de départ, les résultats des clusterings et de l'analyse croisée successive confortent l'idée que la relation à étudier n'est pas celle trop étroite entre formes urbaines et comportement de mobilité, mais celle plus englobante entre affordance spatiale et styles de vie prédominants.

Les associations entre affordance spatiale et régimes d'habiter sont la résultante de régularités statistiques qui caractérisent l'aire d'étude et qui se reflètent dans les tables de probabilités conditionnelles d'un réseau bayésien liant les résultats des deux clusterings. Ce réseau bayésien permet d'évaluer la relation entre les deux variables : l'information mutuelle symétrisée et normalisée est de 41,2% (chaque variable inclut déjà plus de 40% du contenu informationnel de l'autre). En se focalisant sur les associations les plus probables entre les deux typologies, le pouvoir prédictif du modèle probabiliste est encore plus élevé : le régime d'habiter peut être prédit avec une exactitude de 57% à partir de l'affordance spatiale, et cette dernière peut être prédite avec une exactitude de 48% à partir du régime d'habiter, sans impliquer aucune hypothèse particulière sur le lien de cause-à-effet entre ces deux variables composites.

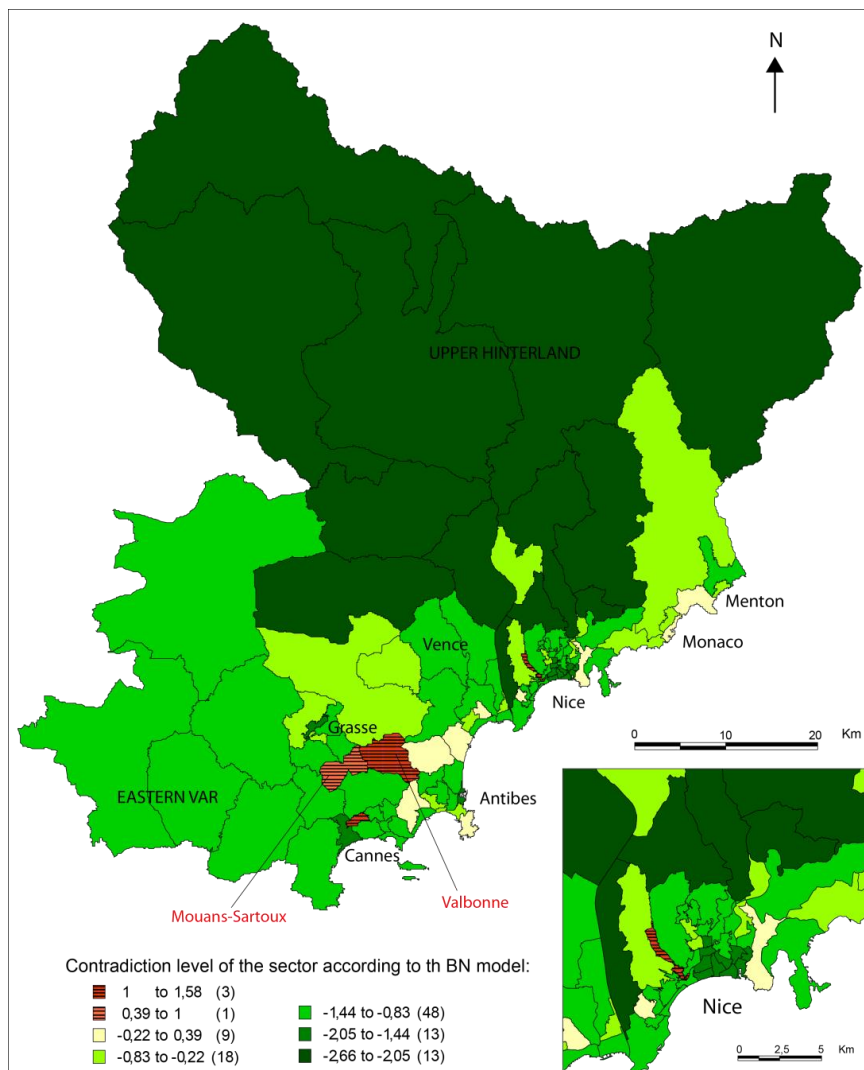


Figure 4.12 – Analyse de contradiction de la relation entre affordance spatiale et régimes d’habiter.

Les géographes sont souvent intéressés autant aux modèles qu’aux écarts aux modèles. Il est ainsi possible, par l’approche probabiliste, d’analyser le niveau de contradiction entre le modèle bayésien et chaque secteur de l’espace métropolitain (Figure 4.12). Le niveau de contradiction est le logarithme à base deux du ratio entre le produit des probabilités indépendantes pour l’assignation aux différents profils d’affordance spatiale et de régime d’habiter calculables pour chaque secteur, et le produit des probabilité jointes des mêmes variables au sein du réseau bayésien qui considère l’existence d’une relation entre elles. La valeur est normalement négative, car le réseau bayésien encode des dépendances statistiques qui sont plus vraisemblables que l’absence de relation. Plus cette valeur de contradiction est faible, mieux le modèle bayésien décrit la relation entre affordance spatiale et régime d’habiter dans le secteur. Cela est par exemple le cas de l’arrière-pays alpin, du moyen-pays au nord de Nice et des quartiers centraux de la ville de Nice. Quelques secteurs constituent cependant des exceptions aux régularités statistiques sous-jacentes au modèle, et montrent des niveaux de contradiction positifs. Il s’agit, par exemple des secteurs de Mouans-Sartoux et de Valbonne, où la présence de la technopole de Sophia Antipolis produit des combinaisons très spécifiques d’affordance spatiale et de régimes d’habiter. Le modèle bayésien peut ainsi identifier autant les associations le plus typiques entre affordances spatiales et régimes d’habiter, définissant les catégories de lieux les plus

représentatives de l'aire métropolitaine, autant des cas particuliers où les relations probabilistes sont contredites et des combinaisons uniques caractérisent des lieux plus exceptionnels (au sens statistique du terme).

Le double regroupement des 105 secteurs métropolitains par rapport aux 27 et 46 descripteurs de l'affordance spatiale et du régime d'habiter, respectivement, est hors de portée pour une démarche qualitative d'expert. Ici aussi, l'alternative aurait pu être une analyse en composantes principales (possible car les données sont quantitatives) suivie d'un algorithme de clustering par minimisation de variance. Encore une fois, la différence principale est celle de l'approche des regroupements les plus homogènes possibles contre celle des regroupements d'objets possédant un certain nombre de caractéristiques communes. Ce second choix a été central dans mon architecture de recherche, car l'affordance spatiale dépend du contexte (les habitants d'un type d'espace pourraient être sensibles seulement à un sous-ensemble de ses caractéristiques physiques et fonctionnelles) tout comme les régimes d'habiter (les différents styles de vies se caractérisant par différents sous-ensembles de variables comportementales).

Un des principaux inconvénients du clustering multivarié bayésien a été en revanche l'obligation de discrétiser les variables empiriques. Les modèles résultant sont ainsi relativement grossiers, comparés à la précision des modèles classiques de régression ou des analyses en composantes principales. Il s'agit du prix à payer pour la robustesse statistique des modèles, car une discrétisation plus fine des variables aurait fait augmenter plus que linéairement le nombre de paramètres probabilistes à estimer dans les données.

Dans Fusco et Perez (2018) j'ai proposé une **comparaison** beaucoup plus détaillée des différences d'approche et de résultats du **clustering hiérarchique bayésien** avec son équivalent conduit dans l'**approche connexionniste neuronale** : le couplage du clustering SuperSOM (Wehrens et Buydens 2007) et SOM (Kohonen 1989) des cartes auto-adaptatives. L'objet de la recherche était ici l'identification de structures spatiales liant les processus d'urbanisation, de modernisation sociodémographique et de développement économique en Inde. Il s'agit clairement d'une problématique dépassant les recherches sur l'organisation interne des espaces urbains et métropolitains, mais elle nous intéresse ici pour ses apports méthodologiques.

Les deux techniques de clustering avaient été testées sur la même base de données décrivant les 640 districts de l'Inde, en utilisant des protocoles très comparables de regroupement de variables, découverte de facteurs latents et clustering final des unités spatiales à partir des facteurs latents. L'approche était celle du clustering sans contrainte spatiale, précisément pour vérifier si les regroupements des districts dans l'espace des variables correspondait à des macro-régions dans le subcontinent indien. Cela a été en effet le cas pour la plupart des clusters (Figure 4.13), avec l'exception des districts les plus métropolisés, économiquement et socialement développés et aux hauts niveaux de consommation. Ceux-ci constituent un archipel de petits sous-espaces au sein de l'Inde, correspondant aux districts centraux des grandes métropoles (Delhi, Mumbai, Chennai, Kolkata, Hyderabad et, de façon plus continue, aux districts à métropolisation diffuse de l'état du Kerala).

Les 10 clusters identifiés par les algorithmes bayésiens et les 9 clusters résultant de l'approche connexionniste montrent des nombreuses ressemblances, tant dans le contenu que dans la spatialisation des clusters. Quelques dissemblances sont néanmoins à remarquer et sont à mettre en relation avec les différences des méthodes synthétisées dans le Tableau 4.1. La principale différence, maintes fois soulignée dans ce texte, est le fait que les algorithmes SOM/SuperSOM opèrent des regroupements qui minimisent la variance interne, tandis que le clustering bayésien identifie des groupes possédant des caractéristiques communes. De ce point de vue, l'approche bayésienne accepte

4. Méthodologies de la connaissance incertaine sur la ville

une plus grande hétérogénéité au sein de la population statistique étudiée. Le clustering bayésien permet également que quelques variables soit très informatives uniquement pour un ou deux clusters.

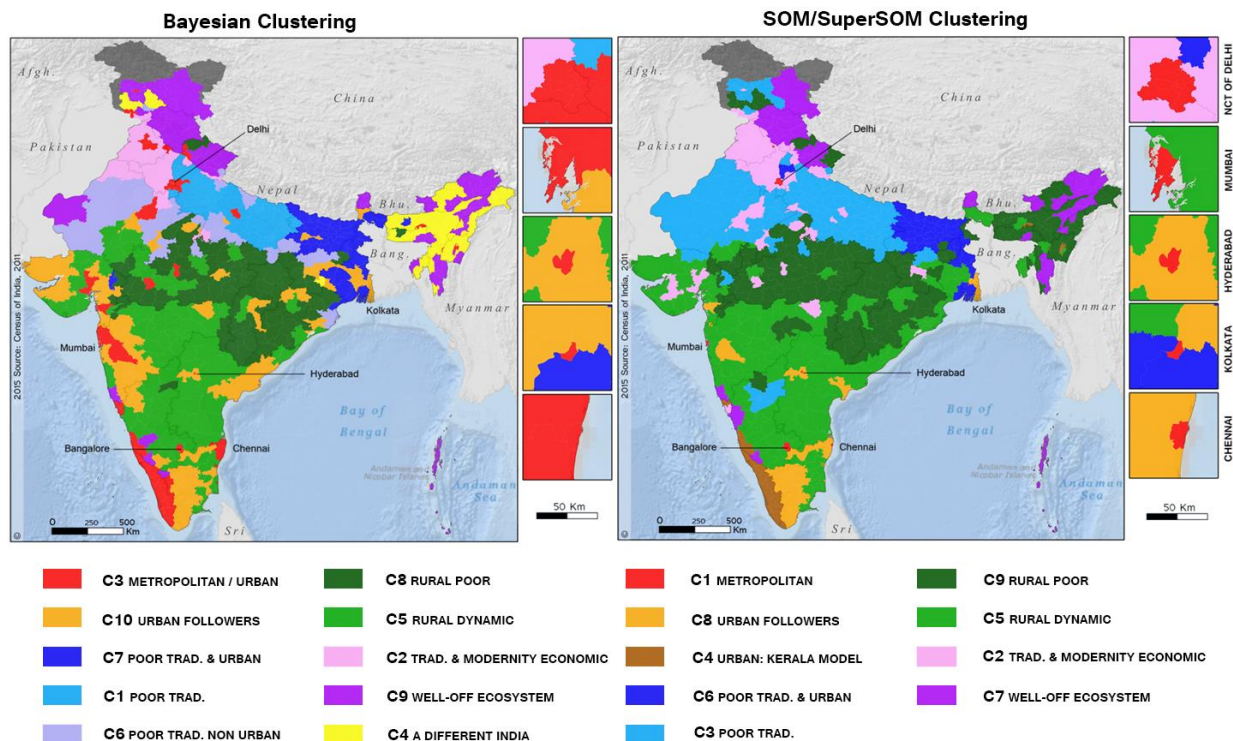


Figure 4.13 - Résultats des clusterings bayésien et neuronal pour l'espace indien.

	Clustering Bayésien	Clustering SOM/SuperSOM
Données	Discrètes	Discrètes et continues
Prétraitement	Discrétisation	Normalisation / Symétrisations
Méthode	Maximisation de la vraisemblance	Minimisation des distances intra-cluster
Approche de segmentation	Même comportement sur un sous-ensemble de variables	Comportement similaire sur toutes les variables
Réduction de la redondance des variables	Facteurs latents par clustering hiérarchique bayésien	Clustering SOM des variables, suivi par clustering SuperSOM des individus
Résultats	Probabilité d'affectation de chaque individu aux différents clusters	Affectation unique d'un individu à un cluster
Nombre de clusters	Optimisé sous contraintes	Choisi préalablement par le modélisateur
Structure entre les clusters	Aucune, mais clusters projetables dans l'espace de la distance informationnelle	Structure topologique de voisinage entre clusters

Tableau 4.1 - Différences entre clustering bayésien et SOM/SuperSOM.

Même si des procédures de validation internes à chaque méthode ont pu être mise en place, identifier le meilleur schéma de regroupement utilisant deux méthodologies différentes est une question particulièrement épineuse (Halkidi et al. 2001). L'obtention de résultats globalement convergents et la compréhension des quelques divergences identifiables permet qualitativement de rendre plus robuste et moins incertaine notre connaissance sur le domaine d'étude. Je me réfère ici à l'incertitude du clustering dans son ensemble et non pas à celle de l'affectation de chaque unité spatiale aux différents clusters. Cet aspect est abordé par le clustering bayésien mais nécessite des cartes auto-adaptatives floues ou bayésiennes en ce qui concerne l'approche neuronale. Le test empirique sur les données indiennes montre en tout cas que les réseaux bayésiens et les mappes auto-adaptatives peuvent être des approches complémentaires pour analyser l'association entre variables et entre unités spatiales au sein d'un fonctionnement de système complexe.

4.5 Au de-là des probabilités bayésiennes : le dialogue avec l'intelligence artificielle.

Notre état de connaissances ne justifie pas toujours le recours à une modélisation bayésienne

Dans la section précédente j'ai montré plusieurs manières qui m'ont permis d'adapter le formalisme des réseaux bayésiens à l'analyse spatiale des phénomènes urbains. En ce qui concerne le clustering multivarié, une comparaison méthodologique a même été conduite avec l'approche connexionniste des mappes auto-adaptatives, même si dans leur version classique, qui n'intègre pas l'incertitude. La base théorique et méthodologique de ces applications réside dans les probabilités et dans le conditionnement bayésien. Le conditionnement bayésien fournit une façon rigoureuse (une norme rationnelle) de révision des croyances dans la mesure où ces croyances peuvent être formulées en tant que probabilités additives. Un des piliers du bayésianisme, en tous cas de sa version la plus orthodoxe (Drouet 2016), est que cela soit toujours possible.

Dans la communauté de l'intelligence artificielle (IA), cette affirmation a été contestée à partir des années 70. L'approche probabiliste bayésienne impose des nombreuses contraintes : d'abord, la nécessité de connaître *ex ante* l'univers de possibles et la capacité d'attribuer une évaluation additive des croyances sur ces événements élémentaires disjoints ; ensuite, la nécessité de disposer des vraisemblances de tout événement pertinent possible en lien avec le phénomène étudié (cela est nécessaire pour appliquer ensuite le conditionnement bayésien). Shafer (1981) a ainsi défendu une approche constructiviste aux probabilités bayésiennes. Ces dernières ne doivent pas être vues comme une norme de raisonnement rationnel, mais comme un modèle possible (parmi d'autres), que nous construisons car il est particulièrement pertinent pour certaines situations de connaissances, mais qui devient impraticable pour d'autres, dans lesquelles nous serons alors appelés à construire d'autres modèles.

Les probabilités bayésiennes élargissent, assouplissent et en même temps rendent plus transparente la modélisation probabiliste, mais ne doivent pas être vues comme la seule modélisation possible en contextes d'incertitude. Pour élargir la gamme de modèles disponibles pour la connaissance incertaine, le géographe a alors tout intérêt à ouvrir un dialogue avec l'intelligence artificielle et notamment l'ingénierie des connaissances, la branche qui s'est plus particulièrement intéressée aux possibles cadres théoriques permettant de modéliser des connaissances incertaines.

Personnellement j'ai ouvert ce dialogue dès le début de ma carrière de chercheur, en me penchant sur les ouvrages de J. Pearl (2000) sur la modélisation bayésienne, de B. Bouchon-Meunier (1993) sur

la logique floue et la théorie des possibilités ainsi que sur les travaux de G. Shafer (1976, 1981) sur la théorie des évidences. Mais l'expérience qui m'a plus marqué dans ce dialogue a été le portage du projet interdisciplinaire « Géo-Incertitude » (2014-15) entre la géographie et les sciences informatiques, soutenu par le CNRS dans le cadre du PEPS Humain. Dans le déroulement de ce projet j'ai eu l'occasion unique de côtoyer et entretenir un échange intellectuel avec les pères fondateurs de la théorie des possibilités, Didier Dubois et Henri Prade de l'Institut de Recherche Informatique de Toulouse (IRIT) ainsi qu'avec les collègues du laboratoire I3S à Sophia Antipolis. Beaucoup des considérations qui suivent ont été le fruit des échanges personnels avec eux, ainsi que des lectures de leurs textes (Dubois et Prade 1988, 2014, Dubois 2006) avec lesquels j'ai dû à mon tour me confronter.

Incertitude, imprécision, incomplétude et incohérence selon l'Intelligence Artificielle

L'intelligence artificielle cherche à représenter les informations et les connaissances que les humains manipulent dans leurs activités. Au Chapitre 1, nous avons vu avec MacFarlane (2013) une première distinction entre information, ensemble d'éléments factuels (mesures, observations) codés, transmis et stockés et connaissance, ensembles d'informations interprétées permettant d'avoir une « image » du monde réel et d'interagir avec lui. Nous avons également remarqué que la littérature sur les systèmes experts a plutôt employé le terme d'information pour les éléments factuels, codés, sur une instance donnée et celui de connaissance pour la généralisation de ces éléments factuels dans la forme des règles qui s'appliquent à toute une série d'instances (les connaissances sont ainsi des propriétés du comportement d'un système). Les deux définitions ne sont pas complètement incompatibles : les règles sont des « images » du monde réel que nous extrayons d'un ensemble d'informations interprétées pour interagir avec le monde. Il est en revanche vrai qu'une connaissance en tant qu'« image » du monde pourrait porter sur une seule instance et ne pas forcément constituer une règle. On fera alors la distinction entre connaissance spécifique (portant sur une instance, un cas d'étude) et connaissance générique (portant sur un ensemble d'instances).

Pourquoi l'agent cognitif (humain ou artificiel) est-il confronté à l'incertitude dans la connaissance générique ? Parce-que les règles ont des exceptions que l'on ne peut pas ou que l'on ne veut pas toutes énumérer. On vise à réduire la complexité des règles, les règles étant un modèle du réel.

Pourquoi l'incertitude serait-elle présente dans les informations ? Parce qu'elles sont produites par des instruments de mesure plus ou moins précis et fiables ou bien elles sont le produit d'évaluations humaines qui sont de nature plus approximative, où pour lesquelles on peut avoir une confiance plus ou moins limitée.

Donc, la partie de l'IA qui cherche à représenter la connaissance (*knowledge representation*) et à formaliser les procédures de raisonnement et de décision à partir de cette connaissance et des informations disponibles se trouve confrontée au problème de traiter des connaissances et des informations imparfaites, au sens où elles sont éventuellement imprécises, incertaines, incomplètes, incohérentes. Ces quatre mots renvoient à différents concepts en IA, que je vais maintenant préciser.

Incertain est ce qui ne peut être que vrai ou faux, mais pour lequel on n'en connaît pas suffisamment pour pouvoir conclure qu'il est définitivement vrai ou faux, tout en pouvant éventuellement pencher pour l'une de ces deux options. L'IA cherche à formaliser l'estimation de la propension de l'agent cognitif pour les deux options.

Imprécis concerne le contenu de l'information par rapport à une norme du précis qu'on se donne. Si, par exemple, je m'intéresse à l'âge d'une personne, normalement je m'attends à obtenir cette

information en années révolues, 25 ans serait dans ce contexte une information précise, 25-26 moins précise et 25-30 encore moins. On voit que l'information précise correspond à une valeur unique, tandis que l'information imprécise correspond à un sous-ensemble, voire à un intervalle. Dans un autre contexte, où la précision recherchée est l'âge en mois, 25 ans révolus devient une information imprécise car il s'agit d'un intervalle allant de 25 ans et 0 mois à 25 ans et 11 mois.

Incomplète est la situation d'une information manquante, qui peut être vue comme un cas extrême d'imprécision. Si, par exemple, le champ renseignant l'âge d'une personne n'est pas connu, nous savons seulement que, étant un être humain, cette valeur peut varier entre 0 et un maximum connu de 120 ans (qui pourrait à son tour ne pas être précisément connu).

Incohérente / inconsistante est la situation d'information contradictoire. Dans le cas d'information incomplète on aurait trop peu d'information, ici on en a trop : même si en nombre limité les informations peuvent se contredire entre elles.

Ces différences que je viens de décliner pour l'information, concernent également la connaissance. Si on continue à définir la connaissance comme ensemble de règles, on serait alors en situation de règles incertaines, imprécises, manquantes ou contradictoires.

L'IA est confrontée à l'information et la connaissance imparfaites dans son effort de coller à la complexité du raisonnement des humains face à la réalité du monde avec lequel ils interagissent. Si l'on se limite seulement à ce qui est précis, certain, complet, etc. on perdrait une partie énorme des informations et des connaissances dont disposent les humains et dont pourraient disposer des systèmes informatiques avancés susceptibles d'aider les humains dans leur interaction avec le réel.

Vers des théories plus générales que la logique classique et les probabilités

La logique classique a fourni longtemps le cadre de référence de la formalisation du raisonnement, tout comme les probabilités ont traditionnellement fourni la seule manière de formaliser l'incertitude. Une chose qui est apparue dès la fin des années 80 dans la communauté de l'IA est que la logique classique, propositionnelle ou du premier ordre, tout en étant incontournable pour la représentation des connaissances pouvait se révéler insuffisante pour plusieurs raisons.

Une première raison c'est que la logique classique ne permet pas de traiter des raisonnements qui tolèrent des exceptions. La deuxième raison est qu'elle ne peut pas raisonner à partir de bases factuelles qui peuvent être incohérentes ; on peut en effet s'assurer que la connaissance, définie comme ensemble de règles, soit cohérente, mais cela n'empêche pas que cette connaissance soit confrontée à des informations factuelles qui puissent être incohérentes dans le cas de sources multiples d'information... la logique classique ne peut pas traiter ces situations. La troisième raison c'est que la logique classique ne permet pas de représenter des propriétés graduelles et donc prendre en compte le fait que les propriétés au lieu d'être vraies ou fausses vont éventuellement pouvoir être vraies à des degrés intermédiaires et le raisonnement doit pouvoir s'appuyer sur ces éléments d'information. Ces différents besoins, qui peuvent être indépendants, ont ouvert trois différents courants de recherche, notamment celui des logiques non monotones.

Le développement de nouvelles logiques a porté également à reconsidérer les formalismes disponibles pour la connaissance incertaine, susceptibles de nourrir les nouvelles propositions logiques. Les probabilités étaient la seule théorie formalisée de l'incertain jusqu'aux années 1950, elles étaient donc un candidat naturel qui a été utilisé largement et majoritairement en IA pour le traitement de l'incertitude, notamment par une approche bayésienne. Pour Jaynes (2003) les probabilités bayésiennes sont même une généralisation du raisonnement permis par la logique, en contexte

d'incertitude. Cependant, d'autres théories ont été successivement développées pour pallier les limitations de la théorie des probabilités. En réalité, ni les probabilités ni la logique classique n'ont été strictement substituées par quelque chose d'autre, l'objectif étant de compléter l'arsenal des outils de représentation disponibles pour avoir une capacité d'expression plus adéquate au contexte des connaissances et des informations que l'on possède.

Les probabilités ne sont en effet pas appropriées pour prendre en compte toutes les formes d'incertitude. En matière d'incertitude on distingue normalement les situations de variabilité (**incertitude ontique**) et celles d'**incertitude épistémique**. La variabilité est celle de phénomènes qui connaissent des fluctuations, par exemple la quantité journalière de pluie dans un lieu donné varie, mais on peut éventuellement faire des statistiques sur cette grandeur et en fournir donc une bonne modélisation objective pour la traiter en tant que variable aléatoire. L'incertitude épistémique porte en revanche sur des faits pour lesquels on a une information incomplète, qui ne sont pas de nature répétitive, et pour lesquels on ne peut donc pas faire des statistiques de manière naturelle. Pour prendre un exemple, si on parle de l'âge d'une personne précise, par exemple le président d'un pays éloigné, que l'on aurait seulement vu à la télévision, mais pour lequel nous ne disposons pas d'autres informations, on peut éventuellement avoir une idée de son âge, mais être encore relativement incertain s'il s'agit plutôt de 60 ou de 70 ans. On pourrait alors représenter cette information comme information imprécise, par le biais d'un ensemble flou, un ensemble qui va avoir des frontières graduelles. En tous cas, il ne s'agit pas d'une variable aléatoire que l'on pourrait nourrir avec des informations statistiques, telles que la distribution d'âge des présidents en exercice dans le monde, car il s'agit d'une personne précise pour laquelle nous disposons d'une information, qui est épistémiquement incertaine. Je remarquerai seulement que, si cette distinction est essentielle dans la formalisation théorique de l'IA, elle peut l'être beaucoup moins dans des cas d'application concrète. N. Taleb (2007) parle à ce sujet de distinction sans différence.

En revenant sur la distinction entre variabilité et incertitude épistémique, si la première a été bien traitée par les probabilités (notamment dans leur approche fréquentielle), nous avons vu comment la seconde pourrait commencer à être abordée, même si de façon un peu grossière, par une représentation ensembliste. La théorie des probabilités subjectives bayésiennes, qui n'est pas basée sur une justification fréquentielle, mais sur une axiomatique de paris échangeables, n'a pas entrepris cette voie d'intégrer une représentation ensembliste aux probabilités et ne peut ainsi pas représenter convenablement toutes les situations d'incertitude épistémique qui se présentent à l'humain et à un agent artificiel.

Selon Dubois et Prade (1988), les probabilités ne sont pas non plus appropriées pour représenter des informations incomplètes. Prenons l'exemple extrême de l'ignorance totale sur un fait. Supposons que l'on ne sache pas s'il y a de la vie au dehors de la Terre. Si l'on représente cette information par une variable binaire (vrai / faux), le principe d'indifférence de Laplace conduirait à une équipartition des probabilités. On pourrait faire une différence entre plusieurs niveaux de développement de la vie (par ex. absence de vie / vie microbienne / vie d'organismes complexes) ; ici l'ignorance complète serait encore une fois modélisée en probabilités par une équipartition. L'incohérence est que, selon le nombre de modalités prises en considération, l'évènement absence de vie est à tour de rôle caractérisé par une probabilité d'abord de $\frac{1}{2}$ et ensuite de $\frac{1}{3}$, une différence non négligeable, alors qu'en réalité on n'en sait rien.

D'autres exemples montrent que l'équipartition des probabilités représente mal l'ignorance. Imaginons d'avoir deux quantités dont nous ignorons tout, au-delà du fait qu'elles peuvent varier dans un certain intervalle. Nous allons équirépartir les deux fonctions de probabilité qui les représentent

sur cet intervalle. Si maintenant nous sommes intéressés à la somme entre ces deux quantités, la théorie des probabilités nous fournit pour cette somme une distribution de probabilité qui est triangulaire, avec un pic sur le point médian de l'intervalle support. Or si l'idée d'une équidistribution sur un intervalle pouvait bien correspondre à une situation d'ignorance totale, le fait que la somme des deux quantités soit représentée par une distribution triangulaire avec un pic bien précis ne nous semble plus correspondre à une situation d'ignorance complète, car nous sommes en train de dire que la valeur médiane sur l'intervalle support est clairement la plus probable.

Une dernière limitation des probabilités c'est que quand on quantifie la probabilité d'un événement E par la valeur p , on a automatiquement la probabilité de l'absence de l'évènement ($\neg E$) par $1-p$, valeur qui est donc utilisée à la fois pour exprimer notre croyance en $\neg E$ et notre incertitude sur E . Cela ne nous permet pas de nous mettre dans une position de retrait épistémique dans laquelle nous pourrions ne pas croire ni en E , ni en $\neg E$.

Des cadres théoriques plus expressifs : probabilités imprécises, évidences, possibilités

Dans des situations réelles, variabilité et incertitude épistémique pourraient se combiner. On a alors besoin d'une structure de représentation plus riche qui permet d'exprimer les deux. Il faudrait donc mélanger des ensembles avec des probabilités. De fait, le modèle le plus général pour représenter de l'incertitude en IA c'est des ensembles de probabilités, ce qui concrètement revient à attribuer aux événements non pas une valeur précise de probabilité, mais des intervalles, c'est-à-dire une borne inférieure et une borne supérieure pour cette probabilité. Ce formalisme, correspondant aux probabilités imprécises (Walley 1991), est assez lourd à manier, même si certains chercheurs s'y attèlent. Il existe alors d'autres théories qui s'avèrent mathématiquement **des cas particuliers de la théorie des probabilités imprécises**, notamment la **théorie des possibilités** et la **théorie des croyances**, qui fournissent deux alternatives plus pratiques de représentation d'informations incertaines. Chacune de ces deux théories fournit non plus une mesure pour quantifier l'évènement mais deux mesures qui vont être dans une relation de dualité. Cette dualité est à mettre en relation avec les bornes inférieure et supérieure des probabilités imprécises d'un événement E et au fait qu'elles constituent en même temps les bornes supérieure et inférieure, respectivement, de l'évènement opposé $\neg E$.

Dans chacune de ces deux théories, il existe ainsi **une première mesure qui permet de caractériser l'engagement épistémique de l'agent dans la vérité de l'évènement**, et qui permet également de représenter des situations plus agnostiques dans lesquelles l'agent n'a de raisons de croire ni dans un événement ni dans son contraire, c'est la mesure de croyance dans la théorie des croyances et la mesure de nécessité dans la théorie des possibilités. **La mesure duale représente la plausibilité, voire le caractère normal et non surprenant d'un évènement** : c'est la mesure de plausibilité dans la théorie des croyances et celle de possibilité dans la théorie des possibilités.

La théorie des croyances a été introduite dans les années 70 par le mathématicien Glenn Shafer (Shafer 1976), qui la nomme théorie de l'évidence, et trouve une élaboration ultérieure dans le modèle des croyances transférables (Smets et Kennes 1994). Le rôle de la densité de probabilité d'une variable en théorie de probabilités y est remplacé par une fonction de masse qui se distribue non pas sur un ensemble de valeurs singulières mutuellement exclusives de l'univers du discours mais sur l'ensemble de ses parties, c'est-à-dire sur des sous-ensembles des valeurs singulières qui peuvent se chevaucher et qui représentent des descriptions plus ou moins précises de la variable en question. Dans la pratique, les masses attribuées sont nulles sur beaucoup de sous-ensembles, autrement la théorie des croyances serait extrêmement lourde à opérationnaliser. C'est la distribution de la fonction de masse

qui permet de calculer ensuite les fonctions de croyance et de plausibilité. La fonction de croyance d'un évènement correspond à la somme de toutes les masses attribuées aux sous-ensembles qui incluent l'évènement en question, cela revient à comptabiliser toutes les « évidences » dont on dispose comme support de l'évènement (elles impliquent l'évènement). La fonction de plausibilité correspond à la somme de toutes les masses attribuées aux sous-ensembles ayant une intersection non vide avec l'évènement en question, ce qui revient à comptabiliser toutes les « évidences » qui ne contredisent pas l'évènement (elles lui sont compatibles). Le degré de croyance est par construction toujours inférieur (éventuellement égal) au degré de plausibilité : les évènements sont plausibles avant d'être crus. Les fonctions de croyance et de plausibilité sont également liées de façon duale : la croyance d'un évènement E équivaut à 1 moins la plausibilité de l'évènement dual $\neg E$. La théorie des croyances est particulièrement utilisée en matière de fusion d'informations, en exploitant la règle de fusion de Dempster (1967) qui permet de fusionner les fonctions de masse attribuées par deux observateurs différents.

La théorie des possibilités correspond à une situation complètement à l'opposé de la théorie des probabilités. Cette dernière peut être appréhendée comme un cas particulier de la théorie de croyances lorsque les éléments focaux (c'est-à-dire les sous-ensembles de l'univers du discours pour lesquels la fonction de masse n'est pas nulle) sont mutuellement exclusifs. Au contraire, dans la théorie des possibilités, les éléments focaux sont tous emboîtés les uns dans les autres et constituent, par-là, des descriptions de plus en plus précises de l'état du monde. La chose la plus remarquable c'est que du moment où ces éléments focaux sont emboîtés les uns dans les autres, on n'a plus besoin de définir la fonction de masse sur l'ensemble des parties du référentiel, mais on peut à nouveau avoir recours à une fonction qui joue le même rôle que la densité de probabilité : la distribution de possibilité, qui permet ensuite de calculer les deux mesures de nécessité et de possibilité, qui sont les deux mesures duales de l'incertitude d'un évènement dans cette théorie.

Pour calculer la possibilité Π d'un évènement, au lieu de faire une somme des probabilités des réalisations possibles élémentaires de l'évènement, il suffit de prendre le maximum (ou la borne supérieure) de la distribution de possibilité π pour les réalisations de cet évènement. La possibilité décrit le caractère plus ou moins surprenant d'un évènement (possibilité 0 = évènement strictement impossible, faible possibilité = évènement presque impossible donc très surprenant, forte possibilité = évènement faiblement surprenant, possibilité 1 = évènement tout-à-fait normal donc pas surprenant du tout). La nécessité N , en revanche décrit la certitude d'un évènement (nécessité 0 pour un évènements complètement incertain, $0 < N < 1$ pour un évènement considéré vrai mais avec une incertitude résiduelle, nécessité 1 pour évènement dont la vérité est complètement certaine). Possibilité et nécessité sont liées de façon duale : la nécessité d'un évènement E est égale au complément à l'unité de la possibilité de l'évènement contraire $\neg E$.

La mesure de possibilité a été réintroduite par L. Zadeh, le père de la théorie des ensembles flous, en 1978 (Zadeh 1978). Mais elle avait été inventée pour la première fois à la fin des années 40 par l'économiste anglais G. Shackle (1949) et a ensuite été développée par D. Dubois et H. Prade dans le cadre d'une plus complète théorie des possibilités (Dubois et Prade 1988). Shackle (1949) interprète l'incertitude par le biais de degrés de surprise qui sont en effet des degrés d'impossibilité ($1 - \Pi$) dans la théorie des possibilités. Les degrés de surprise apparaissaient à Shackle comme étant plus appropriés pour décrire la façon qu'ont les humains d'appréhender l'incertitude dans des processus décisionnels. Sa théorie a soulevé un intérêt assez longtemps mais son modèle, venant d'une génération d'économistes qui n'étaient pas encore rompus aux formalismes mathématiques, était présenté de manière semi-formelle comportant quelques malentendus. Il a ainsi été attaqué

formellement pour certaines incohérences qu'il présentait en matière de conditionnement (c'est-à-dire lorsqu'il faut calculer le degré de surprise conditionnellement à un contexte de connaissance).

Contrairement à la probabilité, qui est additive, la mesure de possibilité est maxitive sur l'union : la possibilité de l'union de deux événements A et B est le maximum entre les possibilités de A et de B. $A \cup B$ est possible comme le plus possible des deux événements qui le constituent. La nécessité, en revanche, est minitive sur l'intersection : pour être certain de la conjonction des événements A et B ($A \cap B$, d'un point de vue ensembliste), il faut à la fois être certain de A et de B, donc le moins certain des deux événements limite la certitude de l'évènement combinant les deux.

A partir de la paire possibilité-nécessité, on peut exprimer, en les distinguant, une grande richesse de situations épistémiques. D'abord celles de la connaissance certaine, où un événement est certainement vrai ($N(E)=1, \Pi(\neg E)=0$), ou certainement faux ($\Pi(E)=0, N(\neg E)=1$). Ensuite celle de l'incertitude totale ($\Pi(E)=1, \Pi(\neg E)=1$), mais également celles des incertitudes intermédiaires où, par exemple, on considère qu'un événement est vrai mais avec une incertitude résiduelle, et on ne peut donc pas exclure que son contraire soit possible ($0 < N(E) < 1$ et donc $0 < \Pi(\neg E) < 1$), clairement plus le niveau de certitude $N(E)$ est élevé, plus la possibilité de l'évènement contraire $\Pi(\neg E)$ est faible. On peut également introduire un niveau de certitude donné pour un événement, ce qui est le point de départ pour la logique possibiliste (Dubois et Prade 2014) : si on a une base de connaissances avec des niveaux de certitude minimaux qui sont associés à des propositions on peut développer une logique possibiliste de l'incertain qui est très proche de la logique classique mais est capable de prendre en compte la propagation des incertitudes dans le raisonnement.

Versions quantitative et qualitative de la théorie des possibilités

Les mesures de possibilité et de nécessité sont donc définies sur un intervalle allant de 0 à 1. Cet intervalle est hérité de la théorie des probabilités. Nous pouvons néanmoins distinguer une théorie des possibilités quantitative et une théorie des possibilités qualitative. Les possibilités quantitatives répondent à la question posée jusqu'à présent, celle de représenter de façon de plus en plus simplifiée une distribution de probabilités imprécises, les mesures de nécessité et de possibilité étant les bornes inférieure et supérieure des probabilités mal connues. La simplification est évidente. En effet on se retrouve toujours dans un certain nombre de situations simplifiées pour les couples de mesures N, Π interprétés comme intervalles $[N, \Pi]$. La première est d'avoir pour un événement donné un intervalle de type $[\alpha, 1]$: α est la borne inférieure de nécessité non triviale, mais 1 signifie que l'évènement, étant au moins partiellement nécessaire, donc certain, est tout-à-fait possible, et doit donc être considéré comme normal et non surprenant. La seconde est le cas inverse $[0, \beta]$ avec une borne inférieure triviale et une borne supérieure non triviale : l'évènement n'est nullement nécessaire, donc il ne peut qu'être, au moins partiellement, surprenant, c'est-à-dire seulement partiellement possible. La théorie des possibilités ne permet ainsi pas, avec une seule distribution de possibilités, la même expressivité de la théorie des probabilités imprécises qui permet de modéliser des phénomènes dont les bornes inférieure et supérieure seraient les deux non triviales.

La théorie des possibilités qualitatives répond en revanche au besoin de raisonner de façon rigoureuse sur des connaissances dont les niveaux de surprise/non surprise et certitude/incertitude ont été évalués qualitativement par des humains. Ces derniers seront sollicités seulement à ordonner (totalement ou partiellement) les différents mondes possibles en ordre croissant/décroissant de surprise et certitude.

Ce qui différencie la théorie quantitative de la théorie qualitative des possibilités est la façon dont on définit le conditionnement. Le conditionnement possibiliste est très proche du conditionnement probabiliste car il est défini par une règle similaire au théorème de Bayes et donc, même s'il utilise des mesures de possibilité, il est basé sur une opération de produit : $\Pi (A \cap B) = \Pi (A | B) \times \Pi (B)$, qui permet de calculer $\Pi (A | B) = \Pi (A \cap B) / \Pi (B)$.

On considère ainsi que les valeurs de possibilité et nécessité aient été fournies par les experts avec un raisonnement statistique permettant de donner un sens aux opérations arithmétiques de produit et de ratio. Donc, même si les opérateurs de max et min continuent à être essentiels pour lier les possibilités et les nécessités, le conditionnement des possibilités quantitatives fait recours à un opérateur quantitatif, nécessitant une échelle numérique cardinale, qui est le produit. Les distributions de possibilités peuvent ainsi représenter, dans un certain nombre de cas particuliers, mais de manière exacte, un ensemble de bornes, par ex. un ensemble de bornes inférieures et supérieures des valeurs d'une distribution de probabilités, s'il s'agit d'intervalles emboîtés, ou plus généralement elles peuvent permettre d'approximer une famille de distributions de probabilité. Des travaux plus avancés (Dubois 2006) montrent comment des paires de distributions de possibilités quantitatives (les *p-boxes*) peuvent fournir de bien meilleures approximations des familles de distribution de probabilité.

La théorie des possibilités qualitatives utilise uniquement les opérateurs de min et de max, même dans le calcul de son conditionnement. Elle utilise une échelle ordinale (totalement ou même partiellement ordonnée) d'évaluations qualitatives de la possibilité (donc du degré de surprise) et de la nécessité (donc de la certitude) des événements. Un événement pourrait ainsi être totalement possible, très possible, moyennement possible, faiblement possible voire totalement impossible (échelle ordinale de cinq modalités complètement ordonnées), modalités qui peuvent éventuellement être symbolisées par des valeurs à première vue numériques de Π (ici elles pourraient par exemple être 1, 0,8, 0,5, 0,2 et 0) mais sur lesquelles on s'interdit d'utiliser des opérations arithmétiques, car seulement les comparaisons d'ordre (donc des min et des max) sont admissibles. La formule du conditionnement possibiliste qualitatif est alors : $\Pi (A \cap B) = \min (\Pi (A | B), \Pi (B))$. Or, le problème est que le min n'a pas d'opération inverse, donc cette équation n'a pas de solution unique, mais des solutions différentes selon le cas de figure :

$$\pi(\omega|A) = \begin{cases} 1 & \text{si } \pi(\omega) = \Pi(A) > 0, & \omega \in A \\ 0 & \text{si } \omega \notin A \\ \pi(\omega) & \text{si } \pi(\omega) < \Pi(A), & \omega \in A \end{cases}$$

L'événement ω reste aussi possible qu'avant ou devient tout à fait possible, sauf s'il est incompatible avec A .

La théorie des possibilités a des liens mais ne coïncide pas avec la théorie des ensembles flous

Zadeh (1965) avait introduit les ensembles flous avant la théorie des possibilités dans les années 60. Successivement, une logique floue a pu être développée à partir de la théorie des ensembles flous (Zadeh 1996). En réalité la théorie des ensembles flous n'est pas une autre théorie de l'incertain au sens de l'IA. Elle ne s'intéresse pas à l'incertitude mais au fait qu'il y a des propriétés graduelles ou des qualificatifs vagues. Dans le langage naturel c'est une situation très courante, lorsque l'on qualifie quelque chose de grand, petit, moyen, jeune, vieux, riche, pauvre, etc. Il y a plusieurs phénomènes qui sont par nature des questions de degré, ce qui se reflète par les catégories logiques de notre langage : on peut être assez vieux ou très vieux, alors que l'on ne peut pas être assez célibataire ou très célibataire parce-que, au moins d'un point de vue juridique, on est marié ou pas. Ces ensembles de propriétés graduelles revêtent un grand intérêt en IA parce qu'ils permettent d'exprimer des

contraintes flexibles très utiles dans les cas pratiques. On peut ainsi utiliser des critères dans la prise de décision consistant à satisfaire ces contraintes graduelles. L'idée originelle de Zadeh, avant la représentation de contraintes souples, c'était celle de formaliser des classes floues de valeurs acceptables pour des évaluations qualitatives en langage naturel. Dans la théorie des ensembles flous on définit des valeurs de vérité intermédiaires pour l'appartenance ensembliste. Il est dès lors intéressant de distinguer l'idée de degré de vérité de celle de degré d'incertitude. Un petit exemple peut nous aider. Si on a une bouteille à moitié pleine, on peut dire qu'elle est pleine au degré 0,5, tout comme qu'elle est vide au degré 0,5 : cette bouteille appartiendrait alors avec un degré 0,5 à la fois à l'ensemble des bouteilles pleines et à celui des bouteilles vides. En IA, la situation d'incertitude est toute autre : elle est le cas d'une bouteille qui serait soit pleine, soit vide, mais dont nous n'avons pas suffisamment d'information pour savoir dans quel état elle se trouve. Une modélisation probabiliste pourrait bien, selon le principe d'indifférence de Laplace, utiliser des valeurs de probabilité 0,5 et 0,5 pour le fait qu'elle soit pleine ou vide. Mais la situation est bien différente de celle de l'appartenance graduée : dans le premier cas on est certain d'avoir une quantité d'eau à boire, dans le second on pourrait soit avoir une bouteille complètement pleine, soit mourir de soif. La prise de décision d'un agent rationnel, dans les deux cas de figure, serait complètement différente.

Les degrés de vérité, correspondant au degré d'appartenance aux ensembles flous, peuvent être manipulés de manière compositionnelle par rapport à tous les connecteurs (négation, conjonction, disjonction, disjonction exclusive, etc.) ou avec des fonctions max et min. Cette dernière option introduit une certaine confusion avec les mêmes opérations en théorie des possibilités, mais il faut garder à l'esprit qu'on ne combine pas les mêmes choses dans les deux cas : des degrés d'appartenance/vérité d'un côté, des degrés de certitude/incertitude dans l'autre. Par ailleurs, les degrés de certitude/incertitude ne sont pas compositionnels par rapport à tous les connecteurs : les possibilités sont maxitives, donc compositionnelles pour le OU, les nécessités sont minitives, donc compositionnelles pour le ET, et quant aux probabilités, elles ne sont compositionnelles que pour la complémentation car $p(\neg A) = 1 - p(A)$, mais $p(A \cap B)$, sauf à être dans une hypothèse forte d'indépendance stochastique, est comprise dans un intervalle.

Donc les ensembles flous parlent de propriétés graduelles et de degrés de vérité car ils correspondent à une vision conjonctive des ensembles : tous les éléments d'un ensemble flou font partie de l'ensemble, sans possibilité d'exclusions mutuelles, même si avec des degrés d'appartenance différents. Une relation peut éventuellement s'établir entre théorie des ensembles flous et théories des possibilités lorsque l'on souhaite rapporter une connaissance graduelle mais certaine sur des catégories relativement grossières (jeune, âge moyenne, âgé, très âgé) à des catégories plus précises (l'âge en ans révolus). Le degré d'appartenance aux ensembles flous peut ici être utilisé pour induire deux distributions, de possibilité et de nécessité, sur les valeurs plus précises.

Il y a en effet un système de vases communicants entre les idées d'imprécision et d'incertitude. Pour un état de connaissances données, plus une affirmation est imprécise, moins elle sera incertaine. Il n'est pas très difficile, en observant un individu, d'être certain que son âge soit compris entre 30 et 60 ans. En revanche, plus on sera obligé à resserrer cet intervalle d'estimation, plus on sera amené à assortir les assertions avec des degrés de certitude qui va être moindre. On pourrait ainsi être presque certain que l'individu en question ait entre 40 et 50 ans, mais on pourrait encore estimer qu'il y ait une possibilité résiduelle qu'il ait un peu plus de 50 ou un peu moins de 40 ans.

La théorie des ensembles flous et la logique floue ont par ailleurs donné naissance à une longue tradition de recherche dans la géographie française. En se limitant aux contributions les plus articulées et générales on pourrait citer celles de Ch. Rolland-Mai (sa thèse d'état de 1984 et l'article sur

« L'espace géographique » de 1987) et de S. De Ruffray (l'habilitation à diriger des recherches de 2007). Pour Rolland-Mai et De Ruffray les ensembles flous permettent de modéliser l'imprécision géographique, notamment l'appartenance à des espaces où les attributs qui les définissent objectivement ne s'exercent pas uniformément sur eux (espace géographique flous, comme l'aire d'influence d'un centre ou l'aire de diffusion d'une culture). Les appartenances graduées permettent d'identifier les noyaux (sous-espaces d'appartenance totale) et les franges de ces espaces (sous-espaces d'appartenance partielle). Lorsque, en revanche, l'appartenance à un espace résulte d'une évaluation subjective humaine, en présence d'informations incomplètes ou incertaines, on serait en présence d'espaces subjectifs incertains, au moins par rapport à un sujet ou à un groupe de sujets. L'utilisation d'un formalisme possibiliste permet à nouveau d'identifier des noyaux et des franges, mais en termes d'appartenance certaine et incertaine. Le « flou » ne relèverait plus de la structure spatiale elle-même, mais bien de facteurs extérieurs à cet espace, liés aux sujets. Ces auteurs postulent que, du point de vue de l'analyse des espaces flous, ces deux cas de figure sont semblables. D'autre part, les lieux sont également ce que les populations qui les habitent en ont comme perception (caractéristiques intériorisées des lieux) et, comme déjà observée dans la Section 1.4, il serait inconcevable de définir des objets sociaux hors d'un contexte d'observation humaine. Est-ce que l'exemple de la bouteille partiellement pleine ou incertainement pleine est encore approprié ? Ne serait-on pas, encore une fois, dans une situation de distinction sans différence pour la science sociale ? La double complexité des systèmes spatiaux (Section 2.2) est susceptible de rapprocher les formalismes de l'intelligence artificielle au-delà de ce qui est prévu par les théories sous-jacentes.

Cette confrontation avec les concepts, les approches et les méthodes de l'intelligence artificielle est susceptible de renouveler les manières de modéliser la connaissance incertaine du géographe et de l'aménageur. Je montrerai dans ce qui suit dans quelle mesure elle a commencé à le faire dans le cadre de mes recherches sur l'organisation spatiale urbaine et métropolitaine. L'objectif toujours recherché est celui d'identifier des opérationnalisations convenables des approches de la connaissance incertaine, permettant de faire de la géographie urbaine quantitative avec l'incertitude.

4.6 Au-delà des probabilités bayésiennes : retours d'expérience sur la ville

Des ontologies incertaines pour la ville

Dans Caglioni et Fusco (2014) j'ai d'abord exploré la manière de relier la réflexion sur les formalismes de la connaissance incertaine avec une approche méthodologique dont l'importance est grandissante dans la modélisation spatiale pour la ville : celle des ontologies formelles (Studer 1998, Gomez-Perez 1999).

Les ontologies formelles ont traditionnellement été une méta-modélisation des concepts utilisés dans les modèles, permettant de réduire les incertitudes liées aux définitions ambiguës des objets urbains. L'objectif des ontologies était classiquement celui de permettre l'opérabilité entre opérateurs humains et artificiels dans l'utilisation d'informations et connaissances opportunément formalisées, sur un domaine particulier (en ce qui concerne le domaine de la ville, voir par exemple Keita 2007, Teller et al. 2007). Dans la mesure où l'on reconnaît le caractère irréductible des incertitudes dans la connaissance urbaine l'intérêt du géographe devrait se porter vers l'approche des ontologies incertaines. Ces dernières peuvent employer différentes modélisations de l'incertitude (probabilités bayésiennes, possibilités, évidences). Leur objectif n'est pas l'interopérabilité d'informations et

connaissances que l'on postule devoir être toujours certaines, mais l'interopérabilité et la possibilité d'effectuer des raisonnements corrects sur des informations et connaissances dont on aura modélisé et évalué l'incertitude. Les applications montrées dans Caglioni et Fusco (2014) sont seulement des exemples particulièrement simples montrant les principes et le potentiel d'une telle démarche. Les connaissances de domaine formalisées par les ontologies incertaines peuvent être vues comme des fragments qui pourraient être successivement récupérés dans le Web sémantique et être combinés par des modélisateurs (humains ou logiciels) comme blocs de base pour développer des modèles plus complexes : des réseaux bayésiens, des réseaux possibilistes, des réseaux bayésiens flous, etc. . Da Costa et al. (2008) ont ainsi proposé les ontologies en langage PROWL (*Probabilistic Web Ontology Language*) pour développer des réseaux bayésiens multi-entités. L'intérêt de faire converger les formalismes de la connaissance incertaine avec les ontologies formelles n'est pas exclusif au domaine de la ville, comme le témoigne Barton et al. (2017) en ce qui concerne le domaine médical.

La conclusion de l'article était que le problème du Web Sémantique sera finalement celui de combiner des ontologies utilisant différents formalismes de l'incertain. Wang et al. (2007) utilisent les théories des évidences et des possibilités pour combiner différentes ontologies déterministes par le biais de procédures d'appariement. L'indication semble donc être celle d'utiliser des théories plus générales pour combiner des ontologies incertaines entre elles, la théorie des probabilités imprécises pouvant alors permettre la combinaison d'ontologies déterministes, probabilistes, possibilistes et en théorie des évidences.

Au-delà de ces perspectives méthodologiques, je pense que le potentiel d'application des ontologies incertaines sera considérable dans le domaine de la connaissance urbaine. Les ontologies « nettes et déterministes » (*crisp*) de la connaissance certaine ont déjà permis l'interopérabilité dans le domaine des SIG et des Web-SIG pour la ville. Les ontologies incertaines peuvent être la phase préalable de modèles plus complexes à base d'incertitude. Les avantages semblent évidents : si l'on accepte le principe que les villes sont des systèmes complexes pour lesquels nous avons souvent des connaissances incertaines sur les mécanismes qui les régissent, dans la recherche scientifique comme dans l'aide à la décision, raisonner sur l'espace urbain est presque toujours raisonner avec de la connaissance géographique incertaine.

Modélisations probabiliste et possibiliste de la polarisation résidentielle provençale

Des premières modélisations pour la connaissance urbaine incertaine ont montré l'intérêt à sortir du cadre probabiliste bayésien. Le projet Géo-Incertitude, que j'ai piloté entre 2014 et 2015, a abouti à un premier modèle possibiliste pour la polarisation sociale des communes d'une aire métropolitaine qui a fait l'objet de plusieurs publications (notamment Fusco, Cao et al. 2015, Dubois et al. 2016). Dans ces publications, le modèle possibiliste a pu être comparé à son équivalent probabiliste, qui avait été développé dans la forme d'un réseau bayésien par F. Scarella dans le cadre de sa thèse (Scarella 2014).

Le modèle a été développé pour rendre compte des dynamiques de polarisation résidentielle observées dans l'aire métropolitaine marseillaise au cours des trente dernières années, une aire de plus de trois millions d'habitant au tour de Marseille, Aix-en-Provence, Toulon et Avignon. Le modèle se focalise sur la répartition spatiale des chômeurs et des cadres en tant que facteurs structurants de la morphologie sociale de l'aire métropolitaine (Centi 1996, Fusco and Scarella 2011). La surreprésentation d'une de ces deux populations cibles est ainsi assimilée, respectivement, à un état de dévalorisation et de valorisation de l'espace résidentiel. La connaissance des facteurs qui induisent la polarisation sociale des communes de l'aire d'étude est néanmoins incertaine. Plusieurs facteurs

contribuent à la valorisation ou à la dévalorisation résidentielle, mais ces facteurs n'agissent pas de façon strictement déterministe. Cela avait justifié le développement du réseau bayésien de F. Scarella.

Le modèle probabiliste (le réseau bayésien de Scarella 2014) et son correspondant possibiliste (le réseau possibiliste de Tettamanzi et Fusco 2016) partagent la même structure de dépendances causales entre les 26 variables couvrant différents aspects tels que la position de la commune dans l'aire métropolitaine, les flux de migrations résidentielles, la présence/absence d'aménités environnementales, la nature du parc de logements, les politiques d'urbanisme et la dépendance de trajectoire (*path dependency*) des spécialisations sociales. D'autres caractéristiques communes sont :

- Il s'agit de modèles à base de connaissance experte. En réalité seuls les paramètres du réseau bayésien avaient été élicités et corroborés par l'analyse des données rétrospectives ; une transformation probabilités-possibilités faisant le moins d'hypothèses sur les probabilités sous-jacentes (Dubois et al. 1993) a été employée pour obtenir les paramètres du réseau possibiliste.
- Ils incluent des variables observables et non observables.
- Les relations probabiliste et possibilistes sont modélisées par des connecteurs logiques bruités et incertains, respectivement, réduisant considérablement le nombre de paramètres à éliciter. Le développement de la théorie des connecteurs incertains a été une contribution originale du projet Géo-Incertitude au développement de modèles graphiques possibilistes.
- Ils modélisent des relations incertaines, incluent des paramètres de fuite (modélisant l'influence de variables omises dans le modèle) et produisent des résultats incertains.

Mais les modèles implémentent deux formalismes différents de la connaissance incertaine : les probabilités, dont les compositions par somme et produit sont bien adaptées à une connaissance « exacte » de leurs valeurs, et les possibilités dont les compositions par max/min sont mieux adaptées à une connaissance qualitative (voir Section 4.5). Une autre différence est la capacité des compositions par max/min à garder trace du paramètre élicité ayant conduit à une prédiction particulière, rendant plus simple l'analyse de sensibilité des résultats aux paramètres de causalité incertaine.

Les deux modèles ont été comparés dans leur manière d'inférer un scénario tendanciel à 10 ans de la polarisation résidentielle dans l'aire d'étude. Les résultats des simulations ont également été comparée à l'aide de géovisualisation interactives à base d'incertitude (Cao et Fusco 2016b). La représentation de la connaissance d'un phénomène complexe comme la polarisation sociale dans une aire métropolitaine est obtenue par un système de tableaux de bords avec des liens dynamiques entre carte, diagrammes et texte. Les niveaux d'incertitude, probabiliste et possibiliste, sont explorables interactivement.

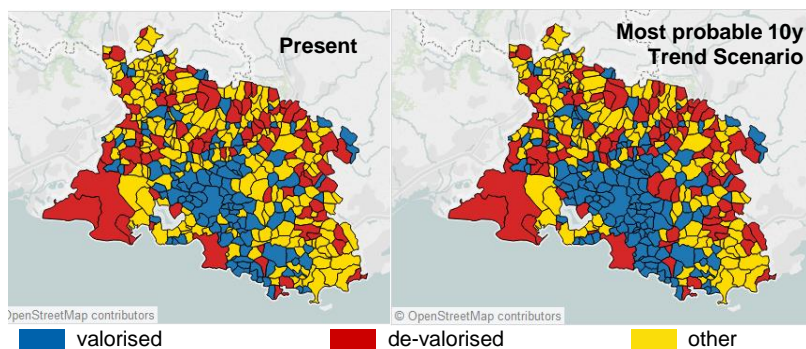


Figure 4.14 – Utilisation naïve du modèle probabiliste.

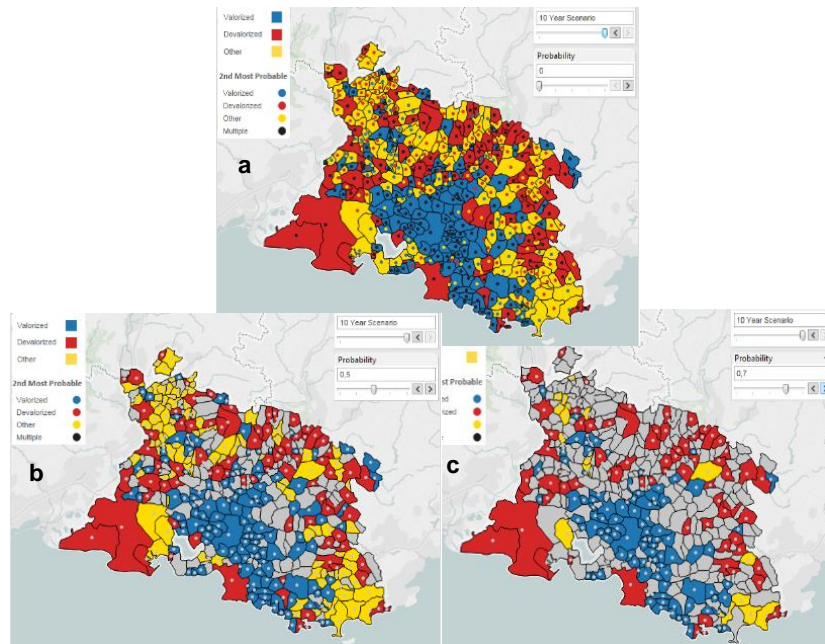


Figure 4.15 – Filtrage des niveaux d'incertitude des résultats probabilistes.

La Figure 4.14 montre, par exemple, une utilisation un peu simpliste du modèle probabiliste. L'état présent de la polarisation sociale y est comparé avec les prédictions les plus probables d'un scénario tendanciel de développement à 10 ans. L'état futur de chaque commune peut être valorisé, dévalorisé ou autre. Les prédictions les plus probables montrent une augmentation de la valorisation autour d'Aix-en-Provence et une certaine stabilité dans le reste de l'aire métropolitaine. Mais cette carte des résultats les plus probables fournit une fausse impression de certitude. Le contenu d'incertitude des probabilités n'y est pas exploité. La Figure 4.15a montre ainsi la seconde prédiction la plus probable du modèle. La Figure 4.15b/c filtre ces résultats par des seuils de probabilité de 0,5 et 0,7, respectivement. La couleur grise est utilisée pour représenter les communes pour lesquelles nous avons une connaissance incertaine, car les prédictions probabilistes ne dépassent pas le seuil. Clairement, en demandant davantage de certitude, les prédictions les plus incertaines sont mises en évidence. En réalité, nous éliminons la fausse perception de certitude donnée par la simple représentation des prédictions les plus probables.

Il est particulièrement instructif de comparer les résultats des deux modèles en termes de prédiction les plus plausibles. Lorsque différentes prédictions sont également plausibles (en termes de probabilité et de possibilité, respectivement) le scénario tendanciel pour une commune donnée devient plus incertain. Le maximum d'incertitude caractérise les communes pour lesquelles les trois prédictions (valorisé, dévalorisé, autre) sont également probables / possibles. Les résultats du modèle possibiliste semblent plus incertains que celui du réseau bayésien. Pour chaque commune, une prédiction plus probable est toujours obtenue, tandis que plusieurs prédictions peuvent être également possibles (Figure 4.16a). Cependant, les différences de probabilités obtenues par conditionnement de valeurs élicitées, pourraient ne pas être retenues significatives. Lorsque des seuils sont imposés à ces différences, plusieurs prédictions peuvent être considérées comme étant équiprobables (Figure 4.16b/c/d). Les prédictions du réseau bayésien deviennent alors de plus en plus incertaines en comparaison à celles du réseau possibiliste. Le meilleur accord entre les modèles est obtenu lorsque l'on impose un seuil de différence de probabilité de 0.25. Dans ce cas, 77,2% des prédictions des deux modèles coïncident, le modèle possibiliste fournissant des prédictions plus

4. Méthodologies de la connaissance incertaine sur la ville

incertaines dans 17,1% des cas et celui probabiliste dans 5,7%. Les deux modèles montrent que le scénario tendanciel de la plupart des communes n'est pas totalement incertain, mais peut souvent montrer une incertitude résiduelle entre deux prédictions alternatives.

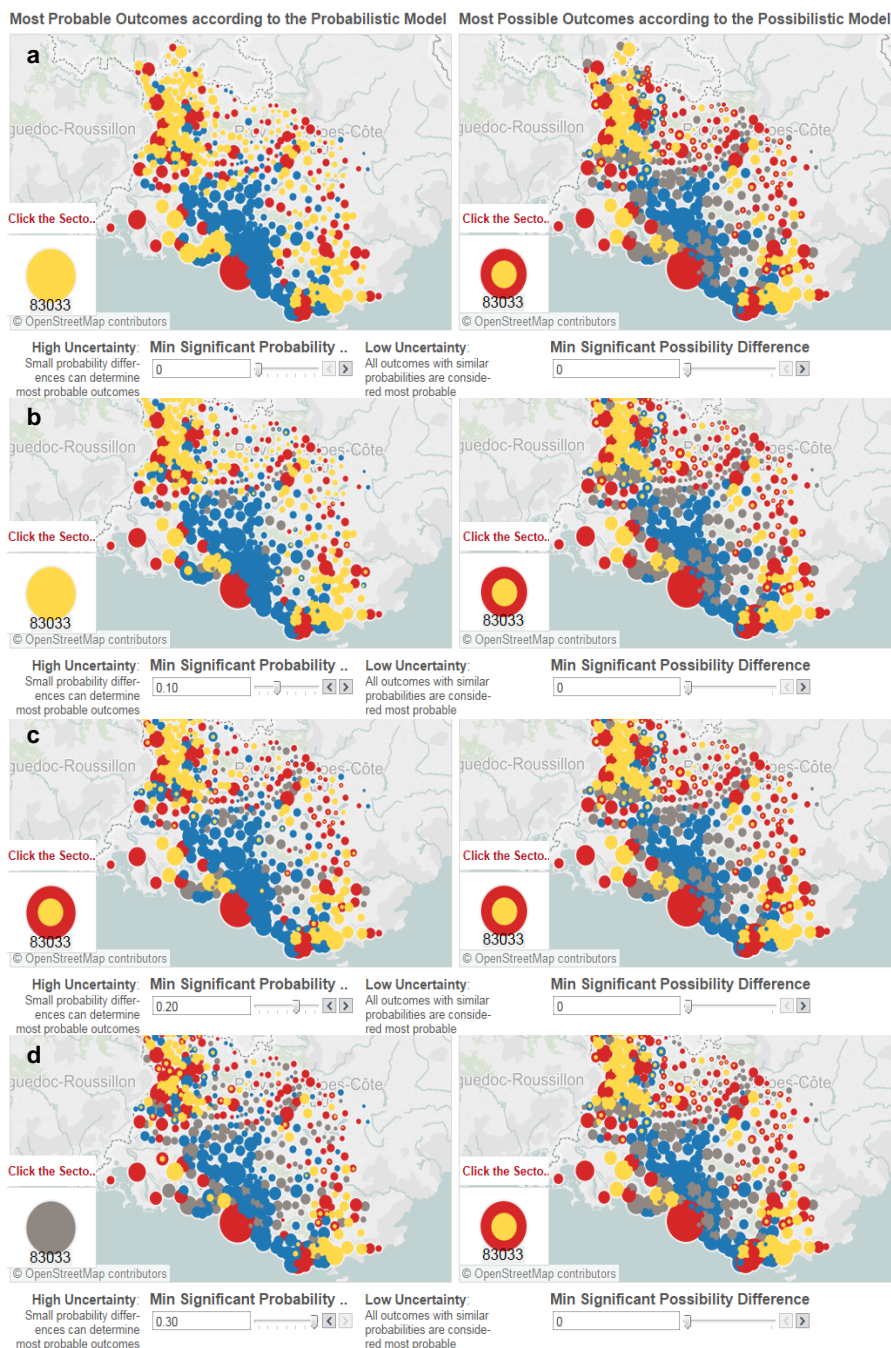


Figure 4.16 – Comparaison des résultats probabilistes et possibilistes.

Une analyse de sensibilité a été conduite pour les prédictions des modèles par rapport aux paramètres, élicités auprès des experts, des connecteurs Max bruité et Max incertain. Ces connecteurs régissent la variable clé du modèle (l'évolution de la valorisation/dévalorisation au cours de la décennie) et jouent un rôle essentiel dans les prédictions. Les résultats de cette analyse sont à première vue contre-intuitifs. Les prédictions du modèle probabiliste semblent moins impactées par

une perturbation des valeurs des paramètres du connecteur que celles du modèle possibiliste. En regardant plus de près, les prédictions du réseau bayésien, si elles se limitent aux valeurs les plus probables, sont plus instables que les prédictions possibilistes : les premières peuvent devenir incompatibles par des petites perturbations des paramètres du modèle, tandis que les secondes, en accommodant davantage d'incertitude, sont toujours des ensembles de valeurs généralisant ou réduisant les résultats obtenus en variant les paramètres.

L'étude a également révélé des différences entre les connecteurs Max bruité et Max incertain lorsqu'il s'agit d'évaluer la plausibilité d'un évènement rare produit par l'accumulation de causes qui peuvent le déclencher de façon indépendante. En général, le connecteur possibiliste se montre plus prudent et la plausibilité maximale pour l'évènement rare doit être forcée par un paramètre de seuil spécifiquement conçu. L'absence de l'évènement rare y sera toujours considérée plausible au degré maximal.

En conclusion, la connaissance de la polarisation sociale nécessite des modèles à base d'incertitude. D'un point de vue méthodologique, le modèle probabiliste ne doit pas être utilisé pour obtenir seulement les prédictions les plus probables, en donnant une fausse impression de certitude. La théorie des possibilités est une alternative intéressante pour l'inférence de connaissances incertaines dans des modèles graphiques. Elle produit des résultats plus incertains qui sont cohérents avec les incertitudes épistémiques des connaissances élicitées. Les résultats des deux modèles convergent lorsque les valeurs des probabilités sont dégradées, mais il s'agit d'un bricolage effectué *a posteriori* et l'incertitude épistémique est modélisée de façon plus cohérente dans le modèle possibiliste. Par les développements de connecteurs incertains au sein des réseaux possibilistes et l'évaluation de leur comportement vis-à-vis de leurs correspondants probabilistes, les résultats de cette recherche contribuent à ouvrir la voie à l'application des réseaux possibilistes dans la modélisation appliquée. La recherche méthodologique en cette direction est en tout cas loin d'être achevée, et appelle à une plus étroite collaboration entre les sciences géographiques et les sciences informatiques.

D'un point de vue géographique, l'intégration de l'incertitude donne des résultats différents par rapport à la seule utilisation des prédictions les plus probables. Qu'il soit par les valeurs dégradées des probabilités ou par celles des possibilités, l'issue la plus plausible d'un scénario tendanciel à 10 ans de l'espace métropolitain provençal est le maintien de la valorisation des communes déjà valorisées autour d'Aix-en-Provence, le maintien de la dévalorisation des communes le plus périphériques de l'aire métropolitaine, l'hésitation entre deux issues possibles pour quelques communes et des situations complètement incertaines dans l'espace intermédiaire (semi-périphérique) par rapport aux principaux centres métropolitains. Il ne s'agit pas seulement d'une image différente par rapport aux prédictions les plus probables, mais d'une image plus sincère, soulignant les limites de notre connaissance.

Le modèle possibiliste de la polarisation résidentielle dans l'aire métropolitaine provençale, montre en tout cas l'intérêt à sortir du cadre probabiliste bayésien pour mieux appréhender les situations d'incertitude épistémique dans la création de scénarios de prospective urbaine.

4.7 Une vision d'ensemble : niveaux d'incertitude et complexité

Les cinq niveaux de l'incertitude

Plusieurs auteurs (Taleb 2007, Walker et al. 2013, Kwakkel et Pruyt 2011, Stirling 2010) ont proposé l'existence de niveaux gradués d'incertitude entre les deux extrêmes de la connaissance certaine et de l'ignorance complète. Je reprends ici l'essentiel de la graduation proposée par Walker et al. (2013).

Le premier niveau est celui de l'**incertitude marginale**, voire négligeable. On dispose d'un et d'un seul modèle des phénomènes étudiés que l'on considère valide, de type déterministe, et l'on effectue une analyse de sensibilité des résultats de la modélisation (par exemple dans la prévision de l'état futur du système) par rapport à quelques paramètres qui restent à calibrer (tout en demeurant dans le domaine de convergence vers une solution unique). Le second niveau, d'**incertitude peu profonde** (*shallow uncertainty*), est celui du modèle probabilisé. On dispose d'un et d'un seul modèle, avec des paramètres probabilistes, et susceptible de produire une pluralité de résultats possibles auxquels sont attachés des probabilités. Selon l'approche probabiliste (fréquentielle, bayésienne) on peut caractériser les résultats par des intervalles de confiance ou des degrés de croyance. Le troisième niveau est celui de l'**incertitude moyenne** (*medium uncertainty*). On dispose de plusieurs modèles du système étudié, relativement comparables, que l'on peut ordonner (totalement ou partiellement) en termes de plausibilité perçue. Ces modèles produisent une pluralité de résultats, que l'on peut également ordonner par niveau de plausibilité.

Les deux niveaux successifs sont ceux de l'**incertitude profonde** (*deep uncertainty*). Dans le quatrième niveau nous disposons d'une pluralité de modèles, aux structures différentes et difficilement comparables entre eux. Nous ne pouvons pas ordonner ces modèles et leurs différents résultats par ordre de plausibilité perçue, car les connaissances expertes et les hypothèses théoriques sont contradictoires et les références empiriques sont insuffisantes. Nous pouvons néanmoins explorer des vastes ensembles de résultats possibles. Dans le cinquième niveau nous ne disposons d'aucun modèle complet du système étudié, mais seulement de quelques éléments très partiels de connaissance et de plusieurs conjectures, en général nous savons de ne pas savoir et nous sommes dans le domaine de l'**ignorance reconnue**, qui est en tous cas différent de l'ignorance totale.

Ces niveaux d'incertitude ne sont pas nécessairement des stades de progression de la connaissance. De surcroît, si les connaissances dans certains domaines ont pu migrer d'un état d'incertitude à l'autre, elles l'ont fait dans les deux sens. Dans certains domaines, la compréhension de mécanismes jusqu'à là peu éclairés a pu réduire la profondeur des incertitudes, dans d'autres, la prise de conscience de la complexité des interactions, précédemment ignorées, et l'accumulation de théories alternatives ont en revanche rendu le cadre des connaissances plus incertain.

Le lien entre niveaux d'incertitude, complexité et modélisations possibles

Je suis ainsi convaincu que **les niveaux d'incertitude sont davantage liés à la complexité des phénomènes étudiés et donc directement aux comportements empiriquement observables et, indirectement, à l'ampleur du questionnement scientifique**, à la façon de découper le réel en mécanismes isolés ou en systèmes et sous-systèmes plus ou moins complexes, à l'ambition de vouloir aborder ou non les évolutions structurelles de l'auto-organisation du système. Corrélativement, ces niveaux renvoient à des méthodologies différentes dans le traitement des connaissances incertaines.

Les incertitudes négligeables caractérisent en effet les problèmes simples, où des mécanismes isolables dans des contextes expérimentaux impliquent un faible nombre de variables. Les modèles

déterministes y sont possibles. Les incertitudes peu profondes sont encore maîtrisables par la théorie des probabilités, essentiellement dans une approche fréquentielle bien adaptée à une empirie qui, même en contexte observationnel, s'intéresse à des phénomènes stables. Les probabilités peuvent faire référence à des processus stochastiques adaptés à des entités élémentaires qui ne sont pas en interaction (processus gaussiens, poissonniens, etc.). C'est le domaine que Taleb (2007) qualifie de « Médiocristan » et que l'on pourrait mettre en relation avec la complexité non organisée de Weaver (1948) : les tendances centrales des distributions des éléments du système sont informatives du comportement macroscopique du système dans son ensemble.

Les incertitudes moyennes renvoient déjà à des niveaux de complexité supérieure, car elles caractérisent la connaissance de sous-systèmes bien délimités et structurellement stables au cours du temps, dans le cadre de systèmes complexes auto-éco-organisés. Elles ne sont pas traitables par les approches classiques des probabilités fréquentielles, souvent à cause de la faible disponibilité de données (*small data*) et/ou des interactions entre variables qui sont de plus en plus nombreuses. La reproduction expérimentale des mécanismes hors de leur contexte devient très difficile, voire peut être informative (le système ne peut être compris que dans son interaction avec l'environnement). On soulignera, avec Pearl (2000), que la possibilité de bien délimiter un sous-système dans la complexité du réel est un préalable pour pouvoir identifier un modèle causal régissant les phénomènes étudiés. L'élicitation de la connaissance experte et son couplage avec les données éventuellement disponibles y jouent un rôle clés dans la production des modèles. Ici les probabilités bayésiennes ont été traditionnellement proposées comme manière d'étendre le domaine d'application des modélisations probabilistes. D'autres formalismes de la connaissance incertaine, notamment les probabilités imprécises, la théorie des possibilités et la théorie des évidences se révèlent néanmoins être plus appropriées dans la prise en compte des incertitudes épistémiques dans des nombreux contextes de recherche. Dans l'étude de systèmes complexes, les modèles graphiques de causalité couplés aux probabilités bayésiennes ont donné lieu aux réseaux bayésiens, développés dès les années 80 et disposant aujourd'hui d'un vaste corpus de solutions algorithmiques. Les autres formalismes de la connaissance incertaine sont susceptibles de proposer des alternatives dans la forme des réseaux crédaux (probabilités imprécises) ou des réseaux possibilistes. Des boucles d'interactions peuvent être introduites dans ces formalismes par la prise en compte de la dimension temporelle, même sous l'hypothèse très restrictive de la stabilité structurelle des modèles.

Les incertitudes profondes caractérisent des systèmes complexes auto-éco-organisés appréhendés dans leur globalité, dans leur évolution structurelle au cours du temps, et offrant des plans d'observation tellement différents que des approches théoriques (et disciplinaires) différents peuvent fournir des modélisations apparemment incompatibles entre elles.

Lorsque ces différents modèles sont au moins disponibles auprès des experts (niveau 4), les formalismes de la connaissance incertaine (par exemple la théorie des possibilités qualitatives) peuvent encore être employées pour essayer de mieux structurer nos connaissances. Kwakkel et al. (2010) proposent en revanche l'approche de l'analyse exploratoire de modèles non prédictifs : dans l'impossibilité d'arbitrer entre modèles et de calibrer leurs paramètres, on explore l'univers de toutes les solutions possibles. On pourrait éventuellement parvenir à des explications de principe du fonctionnement de ces systèmes complexes, au sens d'Hayek (1978) : on peut identifier qualitativement les attracteurs des dynamiques possibles et faire différentes conjectures sur l'issue des dynamiques observables. La classification de Walker et al. (2013) prend en compte uniquement la disponibilité de modèles explicatifs.

Une étude aboutie des morphologies observables d'un système complexe participe également au niveau 4 des incertitudes profondes, mais à titre différent. On peut ainsi identifier les propriétés de la complexité structurelle, tout en restant dans une situation d'incertitude profonde sur les processus morphogénétiques qui les ont produits (absence de théories explicatives ou présence de plusieurs théories possibles en contexte d'équifinalité et éventuellement sous forme d'explications de principe). Les données empiriques peuvent par exemple révéler des distributions à queue épaisse pour certaines variables, mais la focale portée sur les fonctionnements « stables » des systèmes permet de considérer ces distributions comme des propriétés structurelles et pas comme l'issue des dynamiques auto-organisatrices dont il faut rendre compte dans les modèles. Les règles, plus ou moins bien identifiées, caractérisant la complexité structurelle peuvent être utilisées pour prédire les propriétés des valeurs possiblement observables dans le système à un moment donné, dans un cadre incertain qui pourrait inclure variabilité, méconnaissance et présence d'exceptions. Finalement, en mélangeant des hypothèses théoriques relativement faibles avec la disponibilité de données adaptées, on peut gagner de la connaissance (toujours incertaine) sur les associations possibles entre les variables du système par des analyses de clustering. Les formalismes de la connaissance incertaine y trouveront à nouveau un terrain d'application. Ces différentes approches nécessitent néanmoins de la stabilité structurelle des phénomènes et ne peuvent donc être appliquées que dans l'étude du fonctionnement stable des systèmes complexes (même s'il s'agit d'une stabilité apparente nourrie par un renouvellement constant des composantes du système).

L'incertitude profonde oblige à une grande modestie épistémique et à des approches plus qualitatives

En voulant aborder les transformations structurelles des systèmes complexes auto-éco-organisés, on glisse graduellement dans les incertitudes profondes de niveau 5. Les dynamiques cumulatives et non linéaires des interactions au sein des systèmes qui possèdent par ailleurs une complexité structurelle, l'extrême variété des perturbations externes pouvant intervenir sur elles rendent imprédictibles les évolutions structurelles sur le long terme. Les distributions statistiques de différentes variables clés de ces systèmes montrent des queues épaisses, souvent des lois de puissance, pour lesquelles les paramètres statistiques classiques de la moyenne et de la variance ne sont pas stables et ne sont en tous cas pas informatifs des phénomènes macroscopiques émergents dans le temps. Ceux-ci peuvent être impactés par des valeurs extrêmes pour lesquels on ne peut identifier aucun temps de retour fiable. Pour Taleb (2007) on est dans le domaine de l'Extremistan, celui des cygnes noirs, phénomènes extrêmes, à fort impact sur les fonctionnements du système, mais que l'on ne peut pas prévoir préalablement. Qu'il s'agisse de systèmes écologiques ou sociotechniques, les changements structurels soudains qu'y peuvent survenir ne sont explicables qu'*a posteriori* et de façon qualitative. La théorie de l'évolution des espèces, par exemple, ne peut pas être employée pour prédire ni les caractéristiques d'une nouvelle espèce, ni le temps, le milieu et les modalités de son apparition. Aucune théorie prédictive à long terme de l'évolution des fonctionnements, de la forme et de l'organisation spatiale des villes et des métropoles n'est actuellement disponible. Plus en général, nous ne disposons d'aucune théorie prédictive à long terme de l'évolution des systèmes sociotechniques, la ville en étant un bien particulier, avec ses spécificités.

Reconnaître ces domaines d'ignorance ne revient cependant pas à être dans une situation d'ignorance absolue. Taleb (2012) suggère d'adopter une épistémologie négative dans ces situations d'incertitude profonde : les contextes de connaissance produisent souvent des asymétries qu'il faut savoir exploiter. Toute affirmation positive, soit-elle de type explicatif ou prédictif, est relativement

fragile et donc hautement incertaine, car elle repose sur la véracité des hypothèses et des scénarios sous-jacents. Souvent, en revanche, les affirmations négatives sont beaucoup plus robustes : on peut conclure avec une certaine confiance qu'un système ne possède pas une certaine caractéristique, qu'une règle d'association n'est pas valable, qu'un certain phénomène n'en cause pas un autre, qu'un état particulier du système n'est pas atteignable. Cette *via negativa* reste une boussole précieuse en contexte d'incertitude profonde : si l'on peut déterminer ce qui est faux on connaît déjà beaucoup. On verra dans le chapitre suivant comment l'approche des cygnes noirs et la *via negativa* peuvent informer, au moins qualitativement, une démarche géo-prospective pour les espaces urbains et métropolitains.

Intégrer l'incertitude dans les recherches sur la forme urbaine

Une vue d'ensemble des Chapitres 3 et 4 de ce manuscrit me permet en revanche d'identifier un défi scientifique particulier : faire converger l'étude de la complexité de la spatialité urbaine avec la prise en compte de l'incertitude de la connaissance géographique sur la ville. C'est un défi qui reste à relever et en vue duquel mes recherches jusqu'à présent ne constituent qu'un commencement. Le mot incertitude n'apparaît même pas dans « *Principles of Urban Structures* », l'ouvrage clé de Salingaros (2005) dédié à la complexité de la spatialité urbaine et aux différentes théories qui peuvent l'appréhender. Il est à peine en filigrane dans « *The Social Logic of Space* », le travail fondateur de Hillier et Hanson (1984) sur les approches configurationnelles, lorsqu'il est question d'identifier les contraintes minimales permettant l'émergence d'une forme urbaine donnée, tout en laissant indéterminés le reste des processus d'assemblage des éléments. Cependant, tant Salingaros que Hillier et Hanson, impliquent des questions d'incertitude lorsqu'ils posent l'objectif d'identifier et comprendre les règles d'assemblage de la forme par l'observation phénoménologique de cette dernière. A l'autre extrême, les réflexions de Moroni (2015), suivant Hayek (1967, 1978), sur la connaissance incertaine de la ville, de l'explication de ses fonctionnements à la prédiction de son devenir, ne reconnaissent pas ce qui est spécifique à sa spatialité (voir Sections 5.1 et 5.2). Marshall (2012) identifie bien le lien entre complexité de la ville et connaissabilité, mais ces réflexions ne fécondent pas ses travaux sur la complexité de la morphologie urbaine (Marshall 2005, 2009).

Travaux personnels cités dans le chapitre

Caglioni M., Fusco G. (2014) Formal Ontologies and Uncertainty in Geographical Knowledge. *Journal of Land Use, Mobility and Environment (TeMA)*, Special Issue June 2014, 187- 198.

Cao C., Fusco G. (2016a) *Representing uncertain clustering. The case of Social Specialization on the French Riviera*. Géovisualisation interactive – Géo-Incertitude (PEPS CNRS), <https://public.tableau.com/profile/fusco#!/vizhome/RepresentingUncertainClustering/Story>

Cao C., Fusco G. (2016b) *Representing Uncertain Futures: Social Polarization in the Metropolitan Area of Marseille*. Géovisualisation interactive – Géo-Incertitude (PEPS CNRS), <https://public.tableau.com/profile/fusco#!/vizhome/RepresentingUncertainFutures/Story1>

Dubois D., Fusco G., Prade H., Tettamanzi A. (2016) Uncertain Logical Gates in Possibilistic Networks: Theory and application to human geography. *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 82, March 2017, 101-118, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888613X1630233X>

Fusco G. (2004) *Un modèle systémique d'indicateurs pour la durabilité de la mobilité urbaine : les cas de Nice et Gênes dans une comparaison internationale*. 2 volumes + CD-ROM, Chambre de Commerce Italienne de Nice / Université de Nice Sophia Antipolis / Politecnico di Milano, Nice.

Fusco G. (2008) Spatial Dynamics in the Coastal Region of South-Eastern France. In O. Pourret, P. Naïm. B.G. Marcot (eds.) *Bayesian Networks: A Practical Guide to Applications*. John Wiley, New York, p. 87-112

Fusco G. (2010) Uncertainty in Interaction Modelling: Prospecting the Evolution of Urban Network in South-Eastern France. In H. Prade, R. Jeansoulin, O. Papini, S. Schockaert (Eds.) *Methods for Handling Imperfect Spatial Information*. Springer, Berlin, p. 357-378

Fusco G. (2012) Démarche géo-prospective et modélisation causale probabiliste. *Cybergeogeo*, n° 613, <http://cybergeogeo.revues.org/25423>, 23 p.

Fusco G. (2016) Beyond the Built-up Form / Mobility Relationship: Spatial Affordance and Lifestyles. *Computer Environment and Urban Systems*, 60, 50-66.

Fusco G., Caglioni M., Araldi A. (2015) Street network morphology and retail locations. Application to the city of Nice (France). ECTQG 2015 Proceedings, *Plurimondi*, VIII, 17, 15-22, <http://plurimondi.poliba.it/index.php/Plurimondi/article/view/26/15>

Fusco G., Cao C. (2016) Uncertain clustering of social specialization in metropolitan areas. In J.-S. Bailly, D. Griffith, D. Josselin (Eds.) Proceedings of Spatial Accuracy 2016, ISARA, pp. 122-129, <http://www.spatial-accuracy.org/system/files/Uncertain%20clustering%20of%20social%20specialization%20in%20metropolitan%20areas.pdf>

Fusco G., Cao C., Dubois D., Prade H., Scarella F., Tettamanzi A. (2015) Social polarization in the metropolitan area of Marseille. Modelling uncertain knowledge with probabilistic and possibilistic networks. ECTQG 2015 Proceedings, *Plurimondi*, VIII, 17, 117–126, <http://plurimondi.poliba.it/index.php/Plurimondi/article/view/39/26>

Fusco G., Perez J. (2018, en cour d'évaluation) Bayesian Clustering and SOM Neural Networks under the Test of Indian Districts, *Cybergeogeo*, 19 p.

Fusco G., Scarella F. (2011) Métropolisation et ségrégation socio-spatiale. Les flux de mobilité résidentielle en Provence-Alpes-Côte d'Azur. *L'espace géographique*, 2011/4, 319-336.

Fusco G., Scarella F. (2012) Looking for socio-geographic profiles from survey data: the case of home ownership in the French Riviera. Proceedings of the 15th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Avignon, April 25th-27th 2012, 6 p., http://www.agile-online.org/Conference_Paper/CDs/agile_2012/proceedings/papers

Fusco G., Scarella F. (2014) Bayesian Clustering of Housing Preferences and Lifestyles: a Comparative Analysis of Home Ownership in South-Eastern France. UMR ESPACE, halshs-01505436.

Fusco G., Tettamanzi A. (2017) Multiple Bayesian Models for the Sustainable City. The Case of Urban Sprawl. In O. Gervasi et al. (Eds.) *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2017, Lecture Notes on Computer Science*, vol. 10407, Springer, Berlin, pp. 392-407.

Tettamanzi A., Fusco G. (2016) *Possibilistic Network*. Modèle du projet R-Geo-Soft Models accessible sur le site d'hébergement de données et d'applications scientifiques Zenodo, https://zenodo.org/record/165857#.WCOPC_nhCDI

À retenir

- La connaissance de la complexité urbaine inférée par l'analyse de son organisation spatiale est incertaine. Les probabilités constituent le formalisme le plus courant pour modéliser ces incertitudes, surtout dans une approche bayésienne.
- Le raisonnement bayésien peut être mobilisé à la fois pour l'extraction de connaissances de données massives (*big data*) et pour les situations de *small data*, qui restent très courantes en SHS. Même un seul cas d'étude (ici Grenoble) permet une révision des croyances bayésiennes en contexte de pluralité de modèles pour les effets de la densification urbaine.
- Les réseaux bayésiens permettent de coupler la connaissance experte avec l'apprentissage depuis les bases de données. Ils modélisent des systèmes de causalité probabilisée et permettent une grande souplesse de raisonnement inférentiel. 15 ans de recherche m'ont permis d'adapter les réseaux bayésiens aux besoins des connaissances incertaines sur la ville.
- La spatialité et les boucles d'interaction doivent être spécifiquement introduites dans les réseaux bayésiens. Dans mes recherches, j'ai proposé et testé différentes solutions modélisatrices pour relever ces défis.
- Les réseaux bayésiens peuvent modéliser les relations incertaines formes-fonctionnement et les dynamiques territoriales à partir de bases de données. Ils peuvent aussi identifier des « types » qui partagent des sous-ensembles de caractéristiques communes, sans être homogènes, en employant éventuellement l'approche hiérarchisée des variables latentes. Des géovisualisations interactives peuvent explorer les incertitudes des résultats de ces analyses.
- Notre état de connaissances ne permet pas toujours l'emploi des probabilités bayésiennes. D'autres approches se révèlent alors nécessaires, poussant le géographe à

ouvrir un dialogue avec l'Intelligence Artificielle. Cette dernière s'intéresse à l'incertitude, à l'imprécision, à l'incomplétude et à l'incohérence dans le but de coller à la complexité du réel des humains.

- La logique classique et les probabilités ont fourni les premiers cadres théoriques au raisonnement en présence d'incertitude. Des théories plus générales surmontent leurs limites. Les probabilités imprécises sont la théorie la plus expressive. Les théories des évidences et des possibilités en sont des cas particuliers et utilisent deux mesures duales : la première représente l'engagement épistémique dans la vérité d'un événement, la seconde le fait qu'il ne soit pas surprenant. A partir de ces paires de mesures, on peut exprimer, en les distinguant, une grande richesse de situations épistémiques.
- Les ontologies formelles sont traditionnellement employées pour réduire les incertitudes. En reconnaissant le caractère irréductible des incertitudes dans la connaissance urbaine, la perspective est ouverte au développement d'ontologies incertaines pour la ville.
- La modélisation possibiliste de la polarisation résidentielle dans l'aire métropolitaine provençale montre l'intérêt à sortir du cadre probabiliste bayésien pour mieux appréhender les situations d'incertitude épistémique dans la création de scénarios de prospective urbaine.
- Il existe des niveaux différents d'incertitude liés à la complexité des phénomènes étudiés, selon les questionnements posés par le scientifique. Les niveaux d'incertitude demandent différentes approches modélisatrices. Le géographe voulant expliquer et anticiper les transformations structurelles de la ville, est en situation d'incertitude profonde, qui l'oblige à une grande modestie épistémique et à des approches plus qualitatives.

Questions ouvertes

- Jusqu'à où peuvent arriver les formalismes de la connaissance incertaine en contexte d'incertitude profonde ? Comment mieux les raccorder aux connaissances essentiellement qualitatives des explications de principe et de la *via negativa* ? Peut-on identifier des perspectives de recherche interdisciplinaire avec l'intelligence artificielle dans ces directions ? (Chapitre 5).
- Quels sont les domaines de la recherche urbaine qui dépendent plus crucialement de la prise en compte des incertitudes de nos connaissances ? (Chapitre 5).
- Comment remettre la forme urbaine et la complexité structurelle de la ville au centre de la réflexion sur la connaissance incertaine de la ville et de son devenir ? (Chapitre 5).
- Quels regards interdisciplinaires sont susceptibles d'enrichir ultérieurement l'étude de l'organisation spatiale de la ville par le rajout de plans d'observation essentiels à la compréhension de sa complexité structurelle ? Comment intégrer cet enrichissement d'éclairages dans des formalismes, fussent-ils qualitatifs, de la connaissance incertaine ? (Chapitre 5).

5. Pour une géoprospective de la ville résiliente et antifragile

Ce chapitre correspond au projet que je souhaite donner à mon activité scientifique dans les années à venir. Un projet qui, tout en restant relativement flexible, identifie trois directions de recherche interconnectées pour l'étude de la ville en tant que système complexe : trois directions que je qualifierais de morpho-dynamique, morpho-prospective et morpho-culturelle.

L'ensemble du projet trouve sa raison d'être dans les chapitres précédents : les questions ouvertes, les apories, les zones grises déjà identifiées sont ici systématisées et intégrées à des nouveaux concepts (la géoprospective, la résilience, l'antifragilité) pour bâtir un agenda scientifique à la fois ambitieux et pragmatiquement ancré sur l'état de connaissances fourni par cet essai.

Clairement les questions de la complexité structurelle de la forme urbaine et de la connaissance incertaine constituent des entrées privilégiées de l'agenda proposé, mais des nouvelles pistes de recherche viennent enrichir et donner une nouvelle centralité à ces questions. C'est notamment le cas de la convergence des savoirs géographiques et des préoccupations de l'aménagement urbain dans la nouvelle approche de la géoprospective urbaine, qui interroge la forme urbaine par rapport aux fonctionnements futurs de la ville et permet également d'approfondir le dialogue avec l'IA dans le domaine de l'incertitude profonde. Mais c'est également le cas de la convergence des approches quantitatives et computationnelles avec les approches culturelles et sociales de la forme urbaine, permettant de saisir un aspect essentiel de la complexité urbaine : la culture urbaine, porteuse à la fois de connaissances partagées codées, d'inertie temporelle et de potentiel de changement. Cette dernière est une perspective particulièrement prometteuse pour l'agenda de recherche à venir, susceptible de « recoudre » certaines fractures qui ont caractérisé les études urbaines au cours des dernières décennies.

5.1 La géoprospective urbaine : prévoir n'est pas possible, prospecter est nécessaire

L'aménagement et l'urbanisme à la recherche de nouveaux paradigmes opérationnels

L'approche de la complexité a détruit la prétention de capacité prédictive sur laquelle reposait classiquement l'aménagement urbain de l'après-guerre (Chapitre 2). Les premières approches computationnelles de la complexité urbaine ont cependant donné l'impression de pouvoir substituer les modèles précédents, systémiques et déterministes, plus ou moins agrégés et basés sur la théorie du contrôle optimal, avec les nouveaux modèles de géo-simulation de systèmes complexes. Les décideurs, friands d'expertise dans l'aide à la décision, ont cru pouvoir encore demander à la géographie urbaine modélisatrice des prédictions de l'état futur de la ville.

En réalité, la théorie de la complexité montre que les systèmes urbains ne sont ni prédictibles, ni contrôlables. Portugali (2000) développe les conséquences de cet état de fait épistémologique sur la pratique de l'aménagement et de l'urbanisme. Pour lui, le dilemme de l'aménagement pour la ville auto-organisée est le suivant : dans l'absence d'une prédictibilité et d'une capacité de contrôle, y-a-t-il encore un sens à l'aménagement ?

Perceiving cities as self-organizing systems raises doubts as to the whole rationale of urban and regional planning, because the elementary principles that make a system (in this case a city) a self-organizing system, diametrically oppose the theoretical principles and practice of the rational comprehensive planning. Modernist rational planning started from two premises: First, that while a free society, free economy, and non-interventive policy, is the ideal, some degree of intervention and control, in selected domains, is necessary and unavoidable. Second, that science, by its capability to explain the past and the present and on the basis of these to predict the future, will provide the proper means for a planned intervention and control. Planning in general and urban and regional planning in particular have thus become the academic disciplines within which such premises should be elaborated.

Now, in the case of cities as self-organizing systems, science herself tells us that she cannot predict their behavior, that this inability is not a technical shortcoming which science will overcome with time, but the very nature of cities. By their very nature as self-organizing systems, cities are unpredictable, uncontrollable and in this respect are unplanable. This situation might lead to two conclusions. One, to eliminate planning or at least to minimize it as much as permitted by the market - this, as we have seen, was and still is the postmodernist-privatizationist strategy which implies that the old, anachronistic, mechanistic planning approach still prevails. Two, to develop new forms of urban and regional planning which start from the perception of the city as a self-organizing system. (op. cit. p. 230).

La non connaissabilité dans le contexte de l'aménagement et de l'urbanisme

Marshall (2012) reconnaît trois aspects de non connaissabilité ou, au moins, d'incertitude profonde des connaissances, qui concernent l'urbaniste aménageur. La première est la non connaissabilité de l'état et des fonctionnements précis du système complexe qui est la ville telle qu'elle est aujourd'hui, une situation épistémique que l'urbaniste partage avec le géographe. La seconde est la non connaissabilité des effets des interventions, des plans et des projets, sur les fonctionnements futurs de la ville. La troisième est la non connaissabilité d'un état futur optimal d'organisation et de fonctionnement de la ville, état optimal qui aurait une valeur normative pour justifier les interventions de l'urbaniste. Un artefact (un bâtiment, une machine) fonctionne de façon optimale lorsqu'il permet de réaliser les prestations prévues par ses concepteurs. De même, l'organisme biologique atteint un état optimal lorsqu'il est capable de se reproduire, selon le programme de son code génétique. Mais les fonctionnements des systèmes non téléologiques tels que les écosystèmes et les villes ne peuvent pas être évalués à l'aune d'un petit ensemble de fonctions objectifs. Quels sont les objectifs de la ville et, par rapport à ces derniers, quelle est sa taille optimale ? Quelle est son organisation interne optimale ? Quels sont ses fonctionnements optimaux ? Voilà quelques questions qui ont nourri des belles controverses dans l'histoire de l'urbanisme, sans pouvoir parvenir à des conclusions consensuelles, ni théoriques, ni opérationnelles. L'analogie de la praxis de l'urbaniste avec celle de l'ingénieur qui optimise sa machine ne peut plus tenir si l'on accepte le caractère complexe et auto-organisé de la ville.

Selon Bleic et Cecchini (2016), en ce qui concerne la prévision dans les systèmes complexes il y a peut-être des obstacles ontologiques, il y a en tout cas des obstacles théoriques et de modélisation et il y a certainement des obstacles opérationnels (impossibilité d'identifier et de calibrer toutes les relations du système et ses multiples relations avec l'environnement extérieur, impossibilité de mesurer son état fait d'innombrables variables objectives et subjectives, etc.). Or, ces derniers suffisent largement à nous faire prendre conscience de notre faible capacité à faire des prévisions pour les systèmes complexes, notamment sociotechniques. Mais, continuent ces auteurs, il ne s'agit pas

d'une imprévisibilité absolue, car des patterns de comportement sont toujours identifiables (cfr. l'explication de principe de Hayek). Le problème est que l'approche traditionnelle de l'aménagement urbain se base sur des prévisions « locales » et précises, exactement le type de prévision que les obstacles identifiés rendent très incertaine, difficile et souvent impossible. Une tension surgit alors entre la logique conventionnelle de l'aménagement et la demande de prévision.

Une position extrême : face à la complexité, abandonner la téléocratie, poursuivre la nomocratie

Dans la Section 1.4 j'ai déjà eu occasion de présenter la position de l'économiste autrichien Hayek (1967, 1978) sur l'impossible connaissance spécifique de l'état d'un système social complexe. Sa position a exercé une certaine influence au-delà de l'économie. Ainsi, en ce qui concerne l'aménagement et l'urbanisme, Moroni (2010, 2015), tout comme Alfasi et Portugali (2007) y trouvent une justification pour une position relativement extrême. Il faut abandonner la poursuite d'une structure urbaine souhaitée (en termes de localisation d'activités, de bâtiments, etc.), identifiée dans un plan qui s'imposerait aux acteurs de la ville, car cette structure se base sur une connaissance impossible à obtenir. Il faut, au contraire, laisser la libre interaction des agents (ménages, promoteurs immobiliers, entrepreneurs) faire émerger la structure urbaine qui s'adaptera le mieux à un futur inconnu. La solution aux problèmes de l'aménagement sera l'auto-organisation que les décideurs publics devront seconder, et non pas nier ou entraver, et cette auto-organisation ne peut pas être substituée par l'organisation externe imposée par un plan.

Cette position demande **un changement complet des outils mobilisés pour l'aménagement : il faut abandonner les instruments de structuration de l'espace par le projet** (*patterning instruments*, comme les plans de zonage de l'urbanisme règlementaire et les plans de masse des projets urbains) **et se concentrer sur des instruments qui donnent un cadre de règles simples pour les actions autonomes des projets individuels** (*framework instruments*). Les *patterning instruments* seront alors utilisés seulement pour les projets publics financés sur des fonds publics (infrastructures et équipements publics) dans un souci de transparence démocratique et d'orientation (*guidance*) pour les actions des acteurs privés. Les règles serviront essentiellement pour interdire des externalités négatives non désirées, pour permettre à chaque acteur privé de pouvoir exclure un certain nombre de nuisances de la part des propriétaires des parcelles avoisinantes, et pour échanger des droits à bâtir. Elles servent à filtrer les possibles et devraient, selon ces auteurs, être toujours exprimées de manière négative (interdiction de certaines gênes de voisinage), laissant pleine liberté à tout ce qui n'est pas spécifiquement interdit. Dans le contexte de l'inconnaissabilité des états futurs et des solutions optimales à poursuivre, il y a dans ces préconisations un lien avec la *via negativa* dans la gestion d'un système complexe (voir suite du chapitre).

Deux questions centrales me semblent néanmoins fragiliser cette position, qui emprunte beaucoup à une analogie avec les fonctionnements des systèmes économiques de marché.

D'abord, **comment obtenir la coordination entre les acteurs individuels ?** Selon Moroni, Alfasi et Portugali les règles d'interaction ici esquissées sont suffisantes. Mais le sont-elles vraiment ? Quels sont les présupposés dans la capacité de l'interaction entre acteurs à parvenir à des solutions collectivement souhaitables (un élément essentiel dans l'approche libérale de Hayek) ?

La question des règles doit probablement être mieux spécifiée. Quel type de règles peut permettre cette coordination entre acteurs pour parvenir à une organisation spatiale de la ville collectivement souhaitable ? Les règles suggérées par Moroni, Alfasi et Portugali, faites de quelques interdictions de nuisances de voisinages et par un ensemble de mécanismes d'échange de droits à bâtir, reposent lourdement sur la coordination assurée par les mécanismes des prix dans une économie de marché.

Or, est-ce ce type de coordination qui permet de produire la ville auto-organisée souvent observée au cours de l'histoire urbaine ?

Des auteurs comme Vance (1990), Conzen (1960, 2004), Caniggia (1979) ou Badariotti (2006) montrent que la ville traditionnelle du moyen-âge européen n'était pas le simple produit émergent d'actions individuelles disparates. L'émergence des structures urbaines était régie par des règles culturelles, codifiées ou même simplement coutumières, qui subordonnaient les projets des acteurs individuels. Les types architecturaux, les matériaux utilisés, les ordres, les styles, la manière de concevoir l'assemblage des bâtiments le long des rues et des places, d'interconnecter des rues entre elles, le rapport entre le minéral et le végétal, les hauteurs maximales, sont des règles culturelles qui se sont imposées à l'initiative individuelle au cours des siècles. Est-il encore le cas aujourd'hui ? Dans une certaine mesure, les règles de la libre initiative privée dans une économie de marché ont eu comme objectif et comme conséquence l'affaiblissement et le dépassement des contraintes culturelles qui régissaient traditionnellement l'interaction socioéconomique entre les acteurs humains. La liberté d'entreprendre a eu un rôle essentiel dans la révolution industrielle et, par la suite, dans les nouvelles vagues d'innovation sociotechnique dont les NTIC ne sont que la toute dernière. Le même peut être dit pour les règles de fabrication de la ville. Même si des normes culturelles continuent à influencer l'offre et la demande de types architecturaux et de formes urbaines, celles-ci n'exercent qu'une « puissance douce » (*soft power*) relativement fragmentée : la fabrication de la ville s'apparente plus à l'assortiment d'un étalage de supermarché (organisé par segments de clientèle) qu'à la réalisation d'une culture urbaine partagée.

Après tout, qu'est-ce que l'on entend par solution collectivement souhaitable ? Et quelle connaissance positive (même incertaine) justifie les règles de la coordination par les marchés ou par les cultures urbaines ?

Une seconde considération, fragilisant la position de Moroni, Alfasi et Portugali est que leur **raisonnement se focalise toujours sur la disposition de « quantités » de bâtiments et de fonctions dans l'espace urbain. Aucune attention n'est portée à la forme urbaine.** Moroni (2015) prend même expressément distance avec Talen (2012), urbaniste américaine qui explore la possibilité de concevoir un système de règles ayant pour but de produire des « formes » souhaitables. Contraindre les formes est, pour Moroni, déjà glisser vers le « *patterning* » du projet. Or, les règles culturelles étaient surtout des règles régissant l'assemblage des formes, y compris en ce qui concerne les espaces publics, elles ne concernaient qu'exceptionnellement les types d'activités admissibles ou la quantité du bâti.

La question de fond que je soulève par ces deux considérations est qu'**une connaissance urbaine est toujours injectée dans l'urbanisme des règles.** Cette connaissance peut nous venir de l'analyse phénoménologique de l'histoire urbaine, ou bien des modélisations à base de règles implémentable aujourd'hui sur un support informatique (Alfasi et Portugali 2007, Brasebin et al. 2017). Un système de règle n'impose pas directement une solution spatiale unique, morphologique ou fonctionnelle, mais il en exclut déjà certaines (cette fonction de filtre est reconnue par Moroni). Or, si les règles n'imposent rien sur la coordination des formes, seulement certains tissus urbains et certaines configurations pourront être produits, et pas d'autres. Pour être très concret, des tissus de bâtiments mitoyens et alignés aux rues (comme ceux des deux premières familles identifiées dans les villes azuréennes par la méthode MFA, voir Section 3.2) ne pourront pas émerger d'un système de règles donnant pleine liberté dans la disposition des bâtiments au sein des parcelles ou même interdisant expressément de se situer en bordure de parcelle. Finalement ce qui doit être collectivement souhaitable est une solution de localisation de bâtiments et de fonctions ou une forme ? Ou encore une articulation entre les deux ?

Ni Moroni, ni Alfasi et Portugali n'abordent cette question. D'autre part, Moroni demande encore à la puissance publique de fournir un plan des infrastructures publiques (rues, équipements, etc.). Or, quelle forme faut-il donner à ces interventions publiques ? Tout particulièrement, le réseau des rues est un élément essentiel du système morphologique urbain. Les connaissances que nous avons sur la complexité structurelle de la ville, même si qualitatives et incertaines, ne devraient-elles pas être exploitées pour guider cet effort d'intervention consciente sur la ville ?

La gouvernance des interventions, le rôle des modèles, les enjeux de la connaissance urbaine

Marshall (2012) propose ainsi une position beaucoup plus nuancée. Face à l'incertitude des connaissances sur les systèmes complexes, il est pour lui nécessaire de donner une certaine complexité également au système de gouvernance et d'intervention sur les formes de la ville. Celui-ci devra s'articuler sur trois composantes : un plan à base de design (*patterning instrument*), des règles (*framework instrument*), des procédures de contrôle des projets individuels, permettant de gérer des possibles exceptions aux plans et aux règles.

La vision de Moroni, Alfasi et Portugali d'acteurs individuels nécessitant quelques règles claires pour interagir et ayant pleine liberté pour tout ce qui n'est pas explicitement interdit me semble en effet très éloignée de la réalité de la fabrication de la ville, tout comme la multitude de petits acteurs individuels interagissant sur un marché parfaitement concurrentiel à la Adam Smith ne correspond plus à la réalité de nos économies contemporaines. Des groupes de promotion immobilière peuvent aujourd'hui produire des quartiers entiers, imposant sur des centaines d'hectares une infrastructure morphologique (le découpage des rues et des parcelles), des structures bâties et l'essentiel de la localisation des fonctions (surtout dans la mesure où des bâtiments spécialisés laissent peu de place aux changements fonctionnels). Où est l'auto-organisation dans de tels processus de fabrication de la ville ? Qui plus est, il y a un passage de responsabilité (*liability*) des acteurs privés vers la collectivité locale. Une fois la phase de production-commercialisation terminée (un horizon qui se situe dans l'ordre de 10 ans), les dysfonctionnements morpho-fonctionnels de la forme urbaine produite doivent être gérés par la ville (et, financièrement, par les contribuables), et non pas par les promoteurs qui ont conçu le quartier. Dès lors, pouvons-nous vraiment laisser un acteur privé concevoir tout seul la forme urbaine avec un mécanisme de prix aveugle aux dysfonctionnements morpho-dynamiques surgissant dans plusieurs décennies ?

La réponse de Marshall est précisément celle de prévoir des procédures de contrôle pour des projets individuels d'une telle ampleur, qui ne sont pas gérables par un simple jeu de règles (les règles ne concernent normalement pas l'infrastructure morphologique, mais seulement le bâti et les fonctions), ni par un *patterning* strict imposé par un plan (qui ne pourrait pas anticiper de tels projets). Force est de constater que, en dépit de la crise des plans d'aménagement urbain, aucune ville européenne n'a cédé aux acteurs du privé le pouvoir de décider de la forme d'un grand projet urbain en renonçant à des procédures de contrôle et de validation.

Sûrement, comme le soulignent Rabino et Scarlatti (2009), après avoir été rational-compréhensif, l'aménagement urbain se fait réflexif, participatif et finalement facilitateur de l'auto-organisation. En renonçant au rôle de démiurge qui tire sa légitimité de la prévision scientifique, l'aménageur et l'urbaniste peuvent assumer celui de facilitateur de l'intelligence collective (c'est, en fin des comptes, l'ensemble des acteurs qui aménagent l'espace). En parallèle, les modèles se diversifient et s'éloignent des outils de prévision plus traditionnels : les modèles explorent les conséquences potentielles des interventions sous les jeux des hypothèses explicitées par les acteurs (Kii et Doi 2005), les modèles accompagnent la réflexion autour des projets et facilitent la concertation (Étienne 2010), les modèles

visualisent les différentes options des projets (Zhang et al. 2004, Loubier 2006), au-delà du visible les modèles permettent de comprendre les changements de configuration impliqués par les options du projet (Hillier 2014), finalement la modélisation devient une médiation cognitive (Occelli 2002) entre les différents porteurs d'enjeux (élus, aménageurs, entrepreneurs, habitants, associations), les actions envisagées et les réorganisations possibles des formes et des fonctionnements urbains.

Dans ce contexte, j'identifie **deux besoins pour les géographes travaillant sur la ville complexe**.

Le premier est celui de travailler sur le type de connaissance que l'on injecte dans les modèles que l'on peut aujourd'hui mobiliser dans les démarches d'aménagement, des plus qualitatifs aux plus sophistiqués en matière de formalismes quantitatifs. Je ne souhaite pas me prononcer de manière définitive sur le débat entre téléocratie et nomocratie. La perspective, refusée par Moroni, d'implémenter des systèmes de règles visant l'assemblage des formes urbaines, mérite une réflexion plus approfondie. Or, que la gouvernance des interventions sur la ville se fasse essentiellement par le biais de règles (nomocratie) où par l'orientation fournie par un état souhaité de la ville (téléocratie), des modèles et, indirectement, des connaissances seront utilisés pour arbitrer entre des jeux de règles et/ou des formes que l'on souhaite donner à la ville. La communauté des géographes travaillant sur la ville complexe sera toujours sollicitée pour fournir les fondements rationaux de ces arbitrages. Notre éclairage disciplinaire permettra précisément d'aborder les aspects de la spatialité des règles et des organisations urbaines souhaitées. Mais pour le faire, **il nous faudra avancer dans la compréhension de la morpho-dynamique urbaine**, englobant les relations entre formes, fonctionnements et flux de la ville et leurs reconfigurations dans le temps (si pas le temps long de la morphogénèse urbaine, au moins les quelques décennies susceptibles de produire des adaptations réciproques entre formes, fonctionnements et flux). En même temps, il faudra être très explicite sur les incertitudes qui caractérisent cette compréhension. **À terme, notre communauté scientifique devra être en mesure de justifier l'évaluation des règles et des formes proposées dans les documents d'urbanisme** (et même de celles proposées par des acteurs privés dans des projets concernant un fragment significatif de la ville) par rapport à la compréhension que nous avons de la morpho-dynamique urbaine.

Le second besoin est celui d'articuler les connaissances portées par la communauté scientifique (de l'expertise thématique aux modèles et aux formalismes mobilisables) **avec** les propositions d'aménagement de l'espace par les décideurs publics, avec les enjeux, les attentes, les valeurs, mais également l'intelligence collective de **tous les acteurs urbains dans une démarche innovante de réflexion et de projection dans le futur de la ville et de son organisation spatiale**. Une démarche qui laisse un rôle important à l'incertitude des connaissances des états futurs d'un système complexe, à la reconnaissance de la créativité latente dans les actions des acteurs et au potentiel de leur coordination par une vision partagée. **J'identifie cette démarche dans la géoprospective urbaine**, qui sera présentée dans ce qui suit.

La géoprospective urbaine pour explorer les devenirs possibles de la ville complexe

Pouvons-nous fonder une vision du futur de la ville par rapport à des théories faibles, non prédictives ?

Selon Blečić et Cecchini (2016), dans le contexte de l'aménagement et de l'urbanisme, cela est même nécessaire. En reconnaissant que le futur n'est pas déterminé, mais que différents futurs restent possibles, il devient essentiel de mobiliser les énergies des acteurs urbains pour à la fois donner un sens et une légitimité à l'action collective et, en même temps, créer les meilleures conditions pour atteindre le futur consensuellement identifié comme souhaitable. L'outil permettant de rendre

explicite le futur souhaité est le projet, la démarche pour y parvenir est une démarche de prospective (Godet 2007).

J.-P. Dupuy (1992, 2012) fournit des bases théoriques à la nécessité du projet et de la prospective : **le propre des systèmes sociotechniques est la possibilité de la rétroaction par le futur**. Si les acteurs se coordonnent en vue de la poursuite d'un projet qu'ils partagent, ce projet, qui n'existe pas encore comme état (en tous cas futur) du système, est capable d'interagir avec l'état présent et les dynamiques à l'œuvre pour modifier le cours des événements (bien entendu, sans aucune assurance que l'état futur du système soit celui préconisé par le projet). Je rajouterai seulement que, dans le contexte des sociétés contemporaines, et de leur plus grande liberté par rapport aux traditions héritées du passé, une phase préalable d'identification du futur à atteindre est encore plus nécessaire car, sinon, aucun cadre régissant la coordination des actions individuelles ne serait disponible, même pas celui fourni par la tradition.

Mais pour que le projet puisse mobiliser les énergies des acteurs et recevoir leur adhésion, il ne doit pas seulement être partagé, il doit encore être suffisamment optimiste pour être souhaitable et suffisamment crédible pour ne pas être considéré irréaliste et démobiliser les acteurs. Les blocages institutionnels et culturels (que l'on peut éventuellement vouloir dépasser, mais que l'on ne pourra pas ignorer), tout comme les impossibilités théoriques identifiables par les experts jouent ainsi un rôle dans la construction du projet.

La démarche prospective mobilise normalement la construction de scénarios (Godet 2007). Ces derniers sont des narrations du futur, produites par les décideurs en concertation avec l'ensemble des acteurs que l'on souhaite mobiliser, et qui restent cohérentes par rapport à la combinaison des variables clés du système étudié. Ils sont ainsi reconnus comme étant des futurs possibles, même si pas tous également plausibles. Leur construction nécessite la reconnaissance du périmètre du système, la définition d'un horizon temporel de l'exercice, des dynamiques clés de son fonctionnement, de ses variables internes et externes et des leviers d'action qui s'offrent aux acteurs (phase de diagnostic). Un scénario tendanciel, au fil de l'eau, ne comportant aucun changement radical du contexte externe, ni aucune nouvelle coordination entre les acteurs, est normalement identifié en premier. D'autres scénarios, plus ou moins répulsifs ou attractifs (selon le système des valeurs des acteurs) sont ensuite construits en veillant à leur logique interne et externe. La démarche ne doit clairement pas se limiter à identifier les scénarios les plus probables, car la compréhension des dynamiques du système doit permettre aussi de raisonner sur des scénarios moins plausibles mais susceptibles de remettre en discussion des fonctionnements donnés pour acquis. Finalement, un scénario est identifié comme souhaitable et une démarche de projet est entamée pour assurer les conditions de sa réalisation.

Appliquée à une démarche de production d'un projet de territoire, l'approche prospective ici esquissée prend le nom de **prospective territoriale** (Delamarre et Malhomme 2002, Blecic 2012). Pour Blecic et Cecchini (2016) la construction des scénarios ne relève pas du domaine traditionnel des prévisions à base de modèles, dont l'épistémologie serait celle positive de la démarche scientifique. L'utilisation de prévisions faibles, mobilisant à la fois des modèles, des raisonnements qualitatifs autour des hypothèses de ces modèles et les valeurs exprimées par les acteurs, range l'approche des scénarios davantage dans le domaine de la décision. Pour Blecic (2012), la prospective territoriale par le biais de scénarios permet néanmoins d'atteindre les objectifs suivants :

- ancrer la réflexion à la compréhension des dynamiques du système, notamment par la recherche de facteurs clé permettant d'influencer des transitions de régime, grâce aux éclairages que l'on attend toujours de la communauté scientifique ;

5. Pour une géoprospective de la ville résiliente et antifragile

- classer les scénarios en termes de désirabilité, pour identifier des actions susceptibles de réduire le risque de tomber dans les pires scénarios ;
- définir la hiérarchie des actions et leur phasage dans le temps, en empruntant les parcours les plus réversibles (un constat que l'on retrouve également dans Scherrer et Vanier 2013) ;
- parvenir à la co-construction d'un plan de prospective, qui n'est pas le plan traditionnel dont il faut seulement assurer l'implémentation. Il s'agit d'un plan stable sur une longue période en termes de scénario souhaité, qui définit une direction partagée, une vision des risques à éviter, le cadre de ce qui est consenti ou interdit, tout en laissant une grande souplesse à l'implémentation, pas par pas, des projets individuels de la part des acteurs publics et privés.

La production de scénarios peut également bénéficier d'approches de modélisation. J'ai été personnellement confronté à la pratique professionnelle en matière de modélisation prospective pour l'aménagement stratégique du territoire des Alpes-Maritimes, développée entre 2007 et 2008 par les services de l'Etat dans le cadre du PREDAT PACA (DDE 06, 2007 ; RCT-IFACES Développement 2008). Une démarche qualitative de modélisation systémique a ainsi été couplée à une prospection quantitative de domaines particuliers (tels que la démographie et le logement) sur la base de modèles a-spatiaux (comme le modèle Omphale 2000 de l'INSEE). L'incertitude n'a été intégrée à la démarche que de façon qualitative et peu formalisée (discussions autour de la plausibilité des différents scénarios) et éventuellement quantifiée dans quelques calculs des modèles démographiques, de façon complètement déconnectée par rapport à l'ensemble de la démarche de construction de scénarios. Ma propre contribution à cette démarche (Fusco et Scarella 2008), même si limitée à la seule question des logiques spatiales de l'urbanisation résidentielle, a souligné le besoin de prise en compte de la spatialité des phénomènes étudiés pour la construction de scénarios prospectifs. Mais l'apport des géographes dans la prospective territoriale et dans les analyses et les modèles qui peuvent la soutenir peut aller beaucoup plus loin.

La géoprospective territoriale (Gourmelon et al. 2012, Voiron-Canicio 2012, Emsellem et al. 2012, Houet et Gourmelon 2015) a ainsi été récemment identifiée comme un domaine à la fois lié et distinct de celui plus classique de la prospective territoriale. Traditionnellement, la prospective territoriale produit des scénarios sur un territoire et pour un territoire, en y spatialisant quelques variables clés et en réfléchissant à leur devenir par rapport au contexte externe et aux dynamiques internes. Mais la spatialité des phénomènes n'est pas au centre de la réflexion prospective. Comme déjà discuté au cours de la Section 3.6, des phénomènes sociaux, environnementaux et économiques semblent se déployer sur un espace support sans que leur spatialité soit considérée comme un élément essentiel de leur existence et de leur devenir (à l'exception éventuellement du système des transports, qui peut difficilement se concevoir sans une structure spatiale). **La géoprospective territoriale, en revanche, pose la spatialité des phénomènes au centre de ses diagnostics et de ses scénarios.** L'espace n'est pas un support neutre de dynamiques socioéconomiques et environnementales, mais participe pleinement à ces dernières. L'espace n'est pas seulement une opportunité pour créer des cartes et faciliter la communication des scénarios, il est un facteur essentiel pour comprendre les dynamiques à l'œuvre et assurer la cohérence interne et externe des scénarios. Ainsi faisant, la géoprospective crée tout naturellement des ponts vers l'emploi des méthodes d'analyse et modélisation spatiale. Les textes cités semblent caractériser de géoprospectives uniquement les démarches ayant recours à ces outils. Or, l'insertion de ces derniers dans un processus participatif ouvert aux différents acteurs du territoire ne va pas de soi (Étienne 2010). Masson Vincent et al. (2012) soulignent ainsi que la géogouvernance, ouvrant la réflexion sur et la gestion du territoire à la fois à la pluralité des acteurs et aux savoirs spatiaux du géographe, tire profit de modèles et de connaissances à la fois quantitatives et qualitatives. Une démarche purement qualitative mais intégrant la spatialité des phénomènes à toutes les étapes

de la réflexion, depuis le diagnostic jusqu'à la construction et à la validation interne et externe des scénarios, comme celles proposées par Brunet (1990) et Eckert (1996) pour l'évaluation des dynamiques de développement des territoires, participe ainsi pour moi pleinement à la géoprospective territoriale.

Dans une démarche d'urbanisme et d'aménagement urbain, **j'effectue exactement la même distinction entre la prospective urbaine et la géoprospective urbaine**. La première propose des scénarios pour le devenir de la ville, spatialisant éventuellement des variables clés (les populations, les emplois, les nouveaux équipements), mais les possibilités ou les impossibilités de ces scénarios dérivent essentiellement de considérations socioéconomiques, technologiques ou réglementaires, la spatialité n'y joue pas un rôle. La seconde, en bâtissant sur la compréhension des processus morphodynamiques et morphogénétiques de la ville, et en mobilisant par là tous les registres de la forme urbaine (notamment tissulaires, configurationnels, perceptifs, etc.), construit et évalue ces scénarios par rapport aux règles de la spatialité urbaine. Encore une fois, je n'oppose pas les deux démarches par rapport à la nature qualitative ou quantitative des modèles mobilisés. Une géoprospective urbaine, hautement informée des théories de la complexité structurelle de la ville, et intégrant à toutes ses étapes la spatialité de la ville, peut se concevoir aussi de manière qualitative. D'autres approches sont également possibles pour renouveler la prospective urbaine. Le *urban futurecraft* de C. Ratti (2017) est, par exemple, davantage une démarche à base de design : lorsque la prévision est impossible, l'architecte et l'urbaniste deviennent les artisans d'un futur qu'ils participent à créer. Ils identifient des signaux faibles et proposent des prototypes de solutions dont les usagers seront les juges par leur propre capacité à se les approprier. La démarche fait la part belle à l'auto-organisation et à l'innovation technologique, mais est moins analytique, moins attentive à la spatialité de la ville et peut difficilement fonder la décision publique au sein d'un projet global.

Bien évidemment la géoprospective territoriale et la géoprospective urbaine, comme la prospective dans son ensemble, sont une réponse pragmatique à la reconnaissance des incertitudes dans la connaissance que nous avons des systèmes complexes. Classiquement le plan avait pour l'aménagement le rôle d'éliminer les incertitudes résiduelles : c'est par le plan que les prévisions socioéconomiques trouvent leur réalisation la plus rationnelle ainsi qu'une sécurisation par rapport aux éventuels aléas des décisions individuelles. Un changement d'approche (resté longtemps minoritaire) a été l'article de K. Christensen (1985) : il y a des situations où l'incertitude caractérise l'aménagement et ne constitue pas seulement un bruit résiduel. La prospective territoriale, qui se développait dans la même période, est précisément un effort d'organisation en présence d'incertitudes non éliminables (Loinger et Spohr 2005). **L'incertitude n'est pas niée mais assumée, dans la réflexion et dans la justification des actions concertées**. Les démarches géoprospectives mobilisant les méthodes de l'analyse et de la modélisation spatiale sont ainsi poussées à intégrer explicitement les questions de connaissance incertaine, pour informer les acteurs participant à la construction des scénarios des incertitudes inhérentes aux hypothèses et aux résultats des modèles. Plus particulièrement, je pense que **l'incertitude des connaissances des relations morphodynamiques dans la ville doit être un aspect central de toute géoprospective urbaine**.

Mes recherches en modélisation géoprospective et l'horizon d'une géoprospective urbaine

Au cours de ces années je me suis tout particulièrement intéressé aux modélisations mobilisables dans une démarche de géoprospective territoriale, pas nécessairement urbaine, et à la manière d'intégrer la connaissance incertaine dans les modèles et dans la réflexion sur le devenir des territoires.

« *Uncertainty in Interaction Modelling: Prospecting the Evolution of Urban Networks in South-Eastern France* » (Fusco 2010) se situe à la convergence des recherches sur la complexité réticulaire

des relations métropolitaines (Section 2.3) avec l'intégration de l'incertitude probabiliste lorsque l'on se penche sur leurs devenir possibles. L'application, conçue à l'extérieur de toute démarche de projet se limite à la construction d'un scénario tendanciel. Son principal apport est le lien avec l'analyse spatiale, réticulaire, des tendances passées, ainsi que la quantification, l'évaluation et la spatialisation des incertitudes inhérentes à ce scénario relativement plausible d'évolution des réseaux urbains régionaux.

Dans « *Prospecting the evolution of a wine-growing region through MAS modelling* » (Fusco et Caglioni 2014), la démarche de modélisation géoprospective est plus aboutie et s'appuie sur un système multi-agents pour modéliser les interactions entre le développement urbain et l'économie de la vigne dans la région viticole de Bandol avec une graine d'information extrêmement fine (la parcelle viticole). Le modèle est confronté à la difficulté de coupler données empiriques et connaissance experte. De surcroît, les acteurs de la vigne ont été associés seulement en amont et en aval de la démarche de modélisation, pour extraire les règles de fonctionnement du système territorial et pour avoir un retour *a posteriori* sur les scénarios identifiés. Grâce à cette modélisation j'ai pu balayer un plus grand ensemble de futurs possibles pour le vignoble de Bandol, sans pour autant entrer dans l'évaluation relative de leur plausibilité. Le point de départ de la géoprospective est la simulation d'un scénario tendanciel d'évolution de l'urbanisation et des cultures en poursuivant les logiques à l'œuvre au cours des dernières décennies. Des scénarios alternatifs ont ensuite été produits en modifiant de manière cohérente les paramètres des géosimulations. Leur objectif était d'explorer les conséquences possibles sur l'économie viticole de l'éloignement des tendances récentes. Sous la contrainte de différents jeux d'hypothèses, le modèle a permis d'étudier la modification de l'organisation spatiale de la vigne sous la pression de l'urbanisation, et a même identifié un fort potentiel de résilience (ce concept sera présenté dans la suite) de l'économie viticole, susceptible de se redéployer spatialement et de réarticuler son organisation interne, entre grands et petits producteurs, pour s'adapter à la plupart des scénarios testés (Figure 5.1). Or, le réalisme du modèle s'est fait aux dépens de la lourdeur de son code informatique, parvenant à un outil bien situé sur l'extrémité KIDS du « fer à cheval » de la modélisation proposé Banos et Sanders (2013). L'exploration exhaustive de l'espace de ses paramètres, comme dans Pumain et Reuillon (2017) ou Kwakkel et Pruyt (2011), n'a ainsi pas été implémentée. Cette dernière aurait permis d'affiner la connaissance du domaine de résilience du système viticole dans l'espace des paramètres, permettant de mieux cerner les incertitudes des résultats produits.

J'ai en revanche proposé une démarche probabiliste pour la construction de scénarios de développement métropolitain dans Fusco (2012), une recherche déjà présentée sans la Section 4.4. Des modèles probabilistes causaux pour la géoprospective territoriale y sont développés selon le formalisme des graphes de décision (réseaux bayésiens décisionnels). Les modèles proposés intègrent expressément l'incertitude probabilisée : l'incertitude élicitée auprès des experts, ainsi que l'incertitude des scénarios. Ils intègrent également les différentes approches de construction des scénarios (le *forecasting*, prédiction probabiliste des effets plausibles des hypothèses, et le *backcasting*, rétro-diction des hypothèses les plus plausibles sous-tendant des effets attendus), ainsi que l'interaction spatiale entre un nombre limité de sous-espaces clés et les évolutions diachroniques du système territorial. La démarche modélisatrice est appliquée à la construction de scénarios pour le développement territorial de la métropole azurée (Alpes-Maritimes). Elle présente encore plusieurs limites (spatialisation très schématique des variables du système, prise en compte seulement ébauchée des dynamiques temporelles, impossibilité de prévoir les cygnes noirs du fonctionnement territorial, etc.) mais possède un grand potentiel d'intégration à la pratique professionnelle en aménagement du territoire. Elle constitue en effet un trait d'union précieux entre la modélisation

prospective a-spatiale à base de connaissance experte et la modélisation géoprospective spatiale à haute résolution (comme, par exemple, dans Aguejdad et al. 2016).

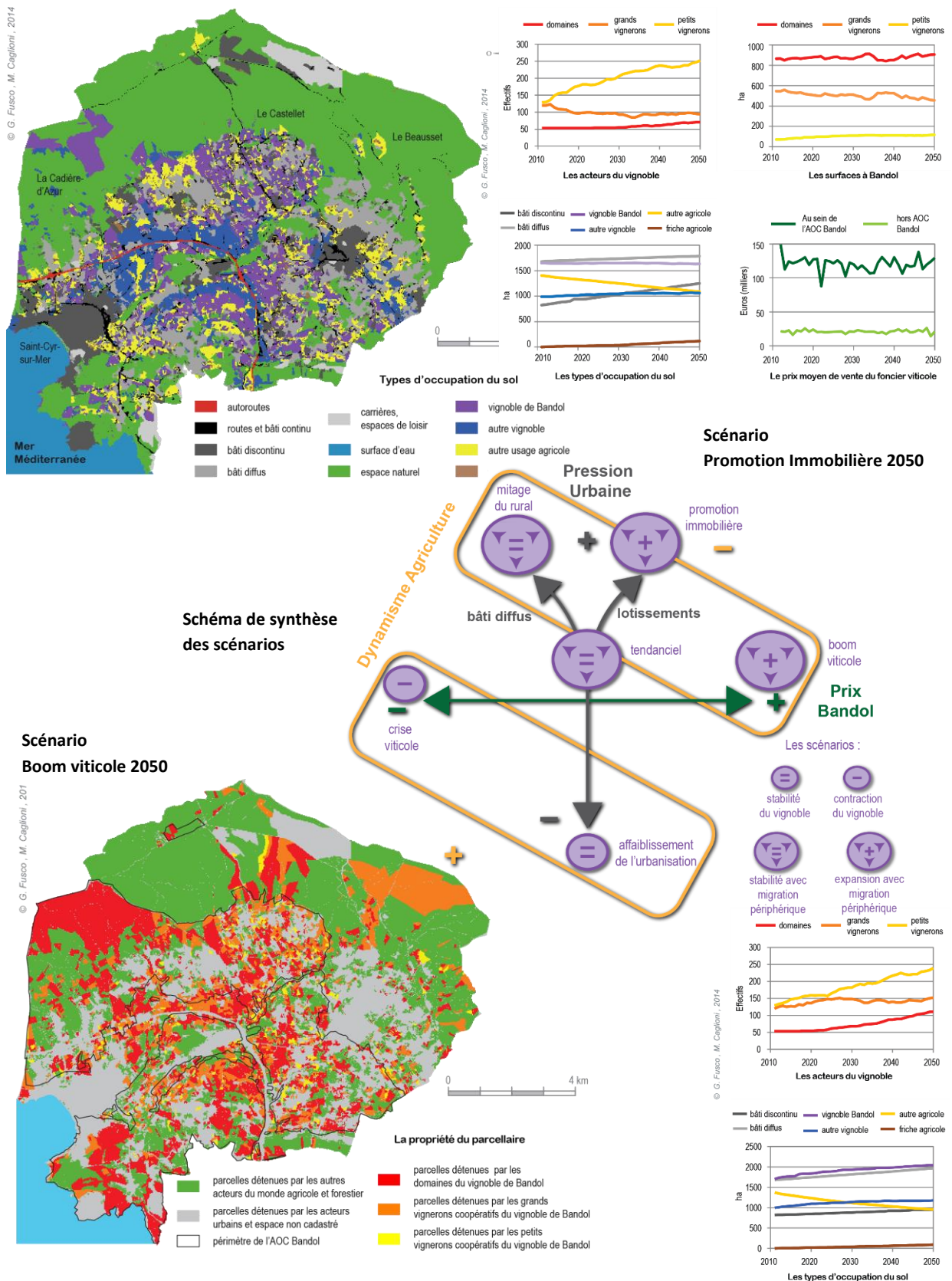


Figure 5.1 - Géoprospective territoriale du vignoble de Bandol à l'horizon 2050.

Finalement, dans Fusco et al. (2015), la construction d'un scénario tendanciel de la polarisation sociale dans les communes de l'aire métropolitaine marseillaise a pu bénéficier de l'apport croisé d'une modélisation probabiliste et d'une modélisation en théorie des possibilités (voir Section 4.6). La connaissance incertaine des facteurs susceptibles de produire la polarisation sociale justifie pleinement le recours à des techniques de modélisation à base d'incertitude. La logique interne aux modèles et leur utilisation pour créer des scénarios contrastés dans une plus large démarche de géoprospective métropolitaine a été au cœur de la thèse de doctorat de F. Scarella (2014). Dans Fusco et al. (2015) l'attention est portée sur les conséquences des différentes formalisations de l'incertain sur le type de connaissance que les deux modèles peuvent produire, même sur le seul scénario tendanciel. Je renvoie mon lecteur à la Section 4.6 pour une plus ample présentation de cette recherche. Je me limite ici seulement à souligner que le modèle possibiliste de la polarisation résidentielle dans l'aire métropolitaine provençale montre l'intérêt à sortir du cadre probabiliste bayésien pour mieux appréhender les situations d'incertitude épistémique dans la création de scénarios géoprospectifs.

Un regard rétrospectif sur les recherches effectuées me permet de conclure sur le rôle central que nous devons donner, en tant que géographes modélisateurs, aux questions de connaissance incertaine au sein d'une démarche géoprospective. Il s'agit d'une question délicate pas seulement d'un point de vue méthodologique, avec les nombreuses ouvertures identifiées dans le Chapitre 4, mais également d'un point de vue sociétal. En effet, dans la mesure où nos modèles s'insèrent dans des démarches de concertation autour de plans et de projets, une tension pourra se créer avec des attentes de connaissance qui continuent à nous être formulées essentiellement en termes de certitudes. La recherche devient alors recherche-action et le géoprospectiviste ne devra pas seulement proposer ses expertises en termes de connaissance incertaine mais également participer à la co-construction de plans et de projets capables de tirer profit de cette connaissance incertaine. **Il s'agit de motiver et de susciter une demande de connaissance incertaine sur les systèmes territoriaux**, une connaissance qui devra être perçue comme étant supérieure à celle plus traditionnellement formulée en termes de certitudes.

Si le regard se tourne vers le Chapitre 3, mon constat porte en revanche sur **l'opportunité de développer une véritable démarche de géoprospective urbaine**. Elle devra être **hautement informée de ce qui est plus spécifique à la spatialité de la ville** (sa forme, ses relations morpho-dynamiques) d'autant plus que les plans et les projets qui sont formulés pour la ville le sont en termes d'intervention sur la forme. Un tel programme de recherche nécessite néanmoins que l'on explore de façon plus spécifique le rôle que les connaissances sur la forme urbaine peuvent jouer dans une démarche de géoprospective pour la ville.

5.2 La forme urbaine, pivot de la ville résiliente et antifragile

Lorsque l'approche de la forme urbaine se fait normative, tension entre innovation et tradition

Le Chapitre 3 a souligné le rôle de la forme urbaine dans l'appréhension de la complexité de la ville, notamment à l'ère de sa transformation métropolitaine. Je souhaiterais ici explorer la centralité de cette organisation spatiale des composantes physiques de la ville dans une approche géoprospective. Comme le soulignent Bleicic (2012) et Delamarre (2002), la prospective est une manière plus souple et stratégique de fonder rationnellement un projet pour un système territorial complexe. La dimension

normative (l'état vers lequel tendre) interfère dès lors avec la vision uniquement positive de l'analyse urbaine (la ville telle qu'elle est structurée, avec ses dynamiques et ses fonctionnements). Or, lorsque l'approche de la forme urbaine se fait normative, le débat urbanistique a tendance à se polariser entre tradition et innovation.

À une lecture superficielle, la question se limiterait à la sempiternelle querelle des anciens et des modernes. Dès sa naissance en tant que discipline et pratique professionnelle, l'urbanisme a été caractérisé par l'opposition entre approche culturaliste et approche progressiste (Choay 1965), la première (Sitte 1889, Howard 1902) recherchant ses modèles dans la tradition urbaine des villes historiques européennes, la seconde (Cerdà 1867 et ensuite tout le mouvement moderne de Loos 1913 à Le Corbusier 1924, 1943) programmant une remise à jour des formes et des schémas théoriques suite à l'évènement de la révolution industrielle. Plus récemment, les reprises stylistiques du postmodernisme peuvent faire penser à un retour vers des solutions culturalistes, mais au-delà des apparences, les formes urbaines de ces réalisations s'insèrent davantage dans les schémas modernistes. Le nouvel urbanisme nord-américain (Duany et al. 2000, Calthorpe 2011) propose de récupérer plus attentivement les solutions vernaculaires, même si la rigidité des formes, finalement toujours imposées de manière *top-down* dans des quartiers entiers, a été parfois critiquée (Grant 2006).

Bien autre est l'intérêt porté aux solutions traditionnelles de la part des architectes et urbanistes de la typo-morphologie urbaine (Muratori 1959, Caniggia et Maffei 1979) ou d'auteurs tels que Jacobs (1961), Hillier (1996), Alexander (1977) ou Salingaros (2005). Dans la mesure où l'on reconnaît à la ville traditionnelle une auto-organisation fonctionnellement efficace (que l'on ne retrouve pas dans la plupart des réalisations du XX^e siècle), la question centrale pour ces auteurs est de comprendre les caractéristiques morphologiques issues de cette auto-organisation. Ils voient ainsi la nécessité de recadrer le débat sur les formes « normatives » pour la ville dans une étude « positive » des propriétés de la ville traditionnelle en tant que système à l'organisation spontanée. Seulement après, il sera possible d'identifier des caractéristiques structurelles (et pas forcément stylistiques) des formes vernaculaires susceptibles d'informer les solutions morphologiques du présent et du futur.

J'aimerais relier ce débat à des considérations plus générales proposées d'abord par Mandelbrot (1982) et ensuite par Taleb (2012) sur l'effet du temps sur les artefacts humains. D'abord il faut concevoir le temps en tant qu'exposition à une accumulation de perturbations, certaines prévues et d'autres non prévues lors de la conception de l'artefact. Ensuite il faut opérer une distinction entre l'objet physique, toujours périssable, et l'objet informationnel, potentiellement non périssable. Une automobile en particulier est un objet physique qui, exposé aux aléas du temps, finit par se dégrader. Mais l'automobile en tant que technologie est un objet informationnel susceptible de répondre différemment au passage du temps : les aléas permettent d'améliorer sa conception d'une version à l'autre. La durée de vie restante à un objet physique diminue au fur et à mesure qu'il avance dans le temps (une distribution gaussienne pourrait bien modéliser cet état de fait). La durée de vie restante d'un objet informationnel suit d'avantage une loi de puissance : une technologie ayant fait la preuve de sa capacité d'adaptation sur un temps très long est susceptible de survivre encore longtemps, tandis qu'une technologie nouvellement arrivée possède, en moyenne, une espérance de vie très courte (ce qui n'exclut pas qu'un petit nombre de nouvelles technologies puisse continuer à survivre ... le temps nous le dira). Mandelbrot parle à cet égard d'effet Lindy (depuis une anecdote sur la pâtisserie Lindy de New York reporté par le journaliste A. Goldman).

Sur ces bases, Taleb (2012) a beau jeu de narguer la néomanie, cette impulsion à passer à la toute dernière technologie en y voyant la solution finalement trouvée aux problèmes du présent (une belle

mise en garde contre l'engouement récent pour la *smart city*). Surtout, il récuse la tendance à décréter l'obsolescence des solutions anciennes, du seul fait qu'elles ne possèdent pas le côté glamour du neuf. Si une technologie ou une procédure a survécu au cours du temps, elle doit avoir une utilité (souvent cachée) que le temps peut voir mais que nos yeux et nos capacités logiques n'arrivent pas à saisir.

J'ai eu déjà occasion de souligner que la ville ne peut pas être assimilée à un simple artefact, elle est davantage un système d'artefacts (Section 2.2). Le raisonnement peut éventuellement tenir si l'on se limite à considérer un type de tissu urbain même si, ici aussi et sauf cas particulier, on ne peut pas identifier un concepteur de l'ensemble de l'artefact. Le tissu peut en tous cas être conçu comme une technologie particulière, produite collectivement, correspondant à un ensemble d'arrangements de rapports spatiaux entre les composantes morphologiques (rues, parcelles, bâtiments, espaces vides) et ayant un contenu informationnel. Les différents types de tissus urbains ont une histoire plus ou moins longue, ce qui nous permet de raisonner sur leur mise à l'épreuve par le temps. Cet exercice sera proposé plus tard.

Pour l'instant, je souhaiterais seulement formuler une mise en garde sur certaines extensions possibles de ce raisonnement. Le projet intellectuel de la mise à l'épreuve du temps pourrait en effet vite tourner vers un grand conservatisme et cela serait paradoxal dans un contexte où l'on reconnaît une mutation profonde de l'urbain (métropolisation, insertion de nouveaux objets urbains, de nouveaux fonctionnements, etc.). Cette considération ouvre sur la question de l'intégration du changement dans le raisonnement sur les systèmes sociotechniques, et notamment sur les formes urbaines. Quelles propriétés systémiques permettent d'absorber ce que l'on appelle aujourd'hui les changements disruptifs ou que Taleb (2007) nomme cygnes noirs ? À cet égard, Taleb souligne que ces changements ne peuvent pas être prévus, ni dans leur nature, ni dans leur magnitude, ni dans leur probabilité d'occurrence. On peut en revanche se focaliser sur les fragilités du système qui va être exposé à ces cygnes noirs et prendre les décisions qui permettent de le rendre plus résistant, plus résilient, plus antifragile. Nous avons à présent besoin d'éclairer ces trois concepts, bien différents.

Résilience et antifragilité

La résistance d'un objet, ou d'un système, est sa capacité à ne pas être perturbé (par une perte de forme, de fonctionnalité ou même d'intégrité) par des événements extérieurs. La poursuite de la résistance est une approche classique dans la conception des objets, des structures bâties et de la protection vis-à-vis des aléas. Construire la digue susceptible de protéger la ville de la plus haute inondation prévisible a ainsi été une réponse classique à l'aléa hydrologique. Or, il s'agit d'une quête impossible pour des systèmes ouverts dans un contexte d'incertitude profonde et de cygnes noirs.

Le concept de résilience vient d'abord de la science des matériaux. Il désigne la capacité d'un matériel à absorber une déformation et revenir ensuite à la forme initiale et correspond, en cela, à une forme de résistance dynamique. Par analogie on peut parler de résilience d'un système à récupérer une certaine fonctionnalité, ce qui amène à produire autant de concepts de résilience spécifique que de fonctionnalités visées (par exemple, la résilience d'un système de transport à revenir à un fonctionnement normal après une perturbation), ce qui pose la question, désormais reconnue, de la résilience de quoi par rapport à quoi (Carpenter et al. 2001).

Deux développements fondamentaux du concept de résilience viennent de l'écologie. Ils sont liés au fait que les écosystèmes sont des systèmes complexes, auto-organisés, non-téléologiques (ils n'ont pas une seule fonction objectif cfr. Marshall 2012) et possèdent un fort contenu spatial.

Le premier est celui de résilience générale (Holling 1973). En écologie, **la résilience générale est « une mesure de la persistance des systèmes et de leur capacité à absorber le changement et la**

perturbation pour continuer à maintenir les mêmes relations entre les populations et les variables d'état¹⁴ » (p.14).

Dans la suite de son article fondateur, Holling identifie trois propriétés-clés pour la résilience des écosystèmes : à la seule persistance, contenue dans la définition de résilience, la complexité des écosystèmes permet d'ajouter également de l'adaptabilité et de la transformabilité. L'adaptabilité est la capacité du système à déplacer ses seuils de persistance, en réponse à des changements internes ou externes, elle est aussi associée à des propriétés trans-scalaires de l'écosystème, permettant de rééquilibrer de façon dynamique l'organisation interne en mobilisant les différentes échelles des composantes et des sous-systèmes. La transformabilité est même un dépassement de la persistance, car elle est la capacité de l'écosystème à se transformer radicalement, lorsque les limites mêmes de l'adaptabilité sont dépassées. Des nouveaux fonctionnements apparaissent, la composition et l'organisation de l'écosystème ne sont plus les mêmes et pourtant... des anciennes composantes ont trouvé une nouvelle vie, d'autres ont changé de rôle, l'écosystème ne s'est pas effondré, il a muté.

Holling (1973) ainsi que Carpenter et al. (2001) proposent ensuite la théorie du cycle de renouvellement adaptatif des écosystèmes, montrant quelles trajectoires peut prendre un écosystème résilient pour passer récursivement d'une phase d'exploitation intense par des espèces colonisatrices aux stratégies de reproduction de type R à une phase de plus grande organisation et présence d'espèces « stabilisantes » aux stratégies de reproduction de type K, en passant par de phases intermédiaires de réorganisation et de décharge. Holling montre toute l'importance des perturbations externes (feu, inondation, etc.) à déclencher ces cycles : la résilience n'est pas une simple capacité à absorber la perturbation externe, mais c'est précisément la solution organisationnelle d'un système complexe qui doit constamment faire face à la perturbation externe et tire profit de cet état de fait... un renvoi au concept d'antifragilité que je présenterai plus bas. Sur ces bases, Folke et al. (2004) qualifient les écosystèmes de systèmes complexes adaptatifs et posent les bases de leur gestion durable, informée de leurs capacités auto-adaptatives. Holling et Sanderson (1996) proposent même une adaptation des cycles adaptatifs pour les systèmes sociotechniques. Inspirés par les cycles de renouvellement sociotechniques dans l'économie de marché proposés par Schumpeter (1942), ces auteurs reconnaissent qu'une différence fondamentale par rapport aux écosystèmes est la tension vers le changement et l'innovation qui est interne au système sociotechnique et ne provient pas de son environnement naturel.

Le second concept est celui de la résilience spatiale. Pour Cumming (2011) elle souligne le rôle de la dimension spatiale dans les écosystèmes. **La résilience spatiale concerne la manière avec laquelle la variation spatiale de variables clés, à la fois à l'intérieur ou à l'extérieur du système, influence (et est influencée par) la résilience générale du système à travers des multiples échelles spatio-temporelles.** Des propriétés trans-scalaires, tout comme les facteurs de forme des écosystèmes (connexions par des corridors, allongement/compacité/fragmentation des habitats, etc.) reviennent alors au centre des mécanismes par lesquels un écosystème est capable de montrer de la résilience, au de-là de la seule diversité des espèces présentes.

Un dernier concept qui est au centre de mes réflexions est celui d'antifragilité, proposé par Taleb (2012). Pour Taleb, il existe en effet une triade de concepts. Le premier est celui de fragilité qui est l'incapacité d'un objet ou d'un système à résister à un aléa externe : toute sollicitation risque d'en provoquer la rupture physique et fonctionnelle. Un second concept que l'on peut lui opposer est celui de résistance (que nous avons déjà présenté). Ce concept peut englober celui de résilience dans le sens le plus restreint de résistance dynamique, capacité à revenir à la forme initiale après une sollicitation

¹⁴ Ma traduction.

(la résilience de la science des matériaux). Un système résistant/résilient possède la capacité de se préserver inaltéré dans un environnement qui le soumet à des perturbations aléatoires. Mais cette opposition fragile/résistant ne permet pas de caractériser les systèmes qui s'améliorent par l'exposition à des perturbations. **L'antifragilité est alors définie précisément comme la caractéristique des systèmes auto-organisés et adaptatifs à améliorer leur organisation interne et leurs fonctionnements suite à la survenue de perturbations aléatoires.** La vie biologique et la plupart des systèmes sociaux (surtout ceux qui sont auto-organisés et pas corsetés par une organisation rigide qui ne peut pas évoluer) sont pour Taleb de très bons exemples de systèmes antifragiles. En dépit de l'opposition de Taleb à assimiler l'antifragilité à la résilience, je pense que les deux concepts sont relativement proches dans la mesure où la résilience est définie comme résilience générale, adaptative et transformative au sens d'Holling. On pourrait identifier l'antifragilité comme une résilience générale à fort degré de transformabilité permettant au système d'acquiescer une auto-organisation toujours plus complexe. L'attention est clairement mise sur les processus évolutifs au sein d'une histoire des systèmes complexes, et pas sur une dynamique de renouvellement adaptatif revenant cycliquement aux mêmes fonctionnements. C'est l'innovation dans l'évolution des espèces et des écosystèmes, et surtout dans les systèmes sociotechniques qui caractérise l'antifragilité. Si les perturbations aléatoires sont nécessaires à entretenir les cycles de renouvellement adaptatifs, elles le sont encore plus pour permettre à un système complexe auto-organisé d'entretenir son antifragilité. Pour paraphraser Lénine, je qualifierai **l'antifragilité d'état suprême de la résilience.**

Résilience et antifragilité morphologiques pour la ville

Tous les concepts développés jusqu'à ici, issues de l'étude des écosystèmes, ou des systèmes sociotechniques en général, nécessitent des déclinaisons particulières si l'on souhaite les appliquer à la ville. La ville est bien un système complexe auto-organisé à fort contenu spatial, mais avec une auto-organisation bien particulière et, surtout, une spatialité, la forme urbaine, bien spécifique. Existe-il une théorie de la résilience urbaine ?

Plusieurs pistes peuvent être identifiées. Forgaci et Van Timmeren (2014) pensent pouvoir la trouver auprès d'auteurs tels que Portugali et Batty, en vue de leurs contributions essentielles aux théories de la complexité urbaine. L'objectif de Forgaci et Van Timmeren est même de jeter les bases d'une théorie de la résilience urbaine générale, couplant les apports de Holling, Cumming, Batty et Portugali. Il s'agit d'un objectif scientifique fort ambitieux, mais ces auteurs ne me convainquent pas de l'avoir atteint, ne serait-ce que parce que il n'existe pas de théorie spécifique de la résilience urbaine auprès de Batty et Portugali. La résilience est absente de principaux ouvrages de Portugali (2000, 2012) et de Batty (2005, 2013) sur la complexité urbaine. Successivement Batty (2016) portera son attention de façon spécifique à la résilience urbaine, mais on restera très déçu à la lecture de ce texte, car il y aborde uniquement des questions de résilience du fonctionnement des systèmes de transport urbain (i.e. retour à la normale) suite à une perturbation.

Il existe en réalité une vaste littérature sur la résilience urbaine, mais elle concerne essentiellement la résilience socio-écologique de la ville, réduisant les fonctionnements urbains à une interaction avec les écosystèmes (Newmann and Jennings 2009, Ernstson et al. 2010, Biggs et al. 2015). Il s'agit d'une perspective clairement centrale en vue du changement climatique et de l'épuisement de certaines ressources naturelles, dans des optiques de métabolisme urbain, de services écosystémiques dans la ville, etc. La résilience socio-écologique n'est néanmoins pas le centre de ma réflexion. Ce que je recherche est une théorie de la résilience générale de la ville dans ses fonctionnements humains, avec une attention particulière au rôle joué par la spatialité physique de la ville.

Par ailleurs, par rapport à la définition même de résilience générale proposée par Holling pour les écosystèmes (voir supra), **les travaux sur la résilience urbaine se sont essentiellement focalisés sur la question de la persistance des fonctionnements urbains face à une perturbation, en oubliant la résilience face au changement.** Les conséquences catastrophiques de l'ouragan Katrina à la Nouvelle Orléans ont souligné l'importance de comprendre ce qui peut fragiliser les fonctionnements d'une grande ville occidentale face à une perturbation majeure (ici environnementale). Or, ce qui différencie le plus les villes des écosystèmes est précisément leur capacité à créer et diffuser le changement sociotechnique comme dynamique endogène (Pumain 2012, mais également Holling et Sanderson 1996). De surcroît, la perturbation est momentanée et on étudiera la réorganisation du système après son passage, le changement est permanent et entraîne normalement davantage d'adaptation et de transformation, pas un simple retour à la normale. Pour être très concret, la construction de nouveaux objets métropolitains (un aéroport, un quartier des affaires), la tertiarisation, la quaternarisation (Debonneuil 2007) ou encore la décarbonisation de l'économie urbaine, le vieillissement de la population et le changement des styles de vie urbains sont autant de changements par rapport auxquels la ville doit faire preuve de résilience adaptative et transformative.

Finalement, la spatialité de la ville est bien particulière par rapport à celle des écosystèmes, comme montré par tout le corpus de recherches mobilisées dans le Chapitre 3. La résilience spatiale de Cumming est alors un excellent point de départ, mais on se gardera bien de transposer la spatialité des écosystèmes à celle des formes et des fonctionnements humains de la ville. **La résilience urbaine face au changement et en vertu de sa spatialité me semble alors un domaine de recherche pour lequel un agenda de recherche reste à bâtir.** Pour délimiter l'ambition de cette direction de recherche, je me focaliserai ici sur la résilience de la ville physique, l'*urbs* : dans quelle mesure la forme urbaine est résiliente face au changement ? Dans quelle mesure est-elle fragile au risque d'obsolescence pouvant condamner un pan entier de la ville à une destruction/reconstruction intégrale ? Il s'agit, clairement, d'une contribution à une évaluation plus globale de la résilience de la société urbaine mettant en relation le contenu (la *civitas* et ses fonctionnements socio-spatiaux) avec le contenant (l'*urbs*). Plusieurs auteurs me permettent d'identifier des aspects plus ciblés, contribuant à cette perspective plus spécifiquement morphologique.

Voiron-Canicio (2014) souligne la nécessaire prise en compte des différentes échelles de la ville, mais surtout le fait que la production de l'innovation dans la ville est une clé de la résilience urbaine. Voiron-Canicio et Dutozia (2017) repositionnent encore plus clairement la question de la résilience urbaine dans le cadre de l'incertitude inhérente aux systèmes complexes, et pas uniquement dans celui des systèmes d'aléa et de risque. Des considérations méthodologiques sont également développées, prônant l'emploi de formalismes de la connaissance incertaine de type possibiliste lorsque les connaissances disponibles ne permettent pas de justifier une approche probabiliste. L'innovation joue un rôle essentiel dans l'appréciation de la résilience urbaine, et dans son acception plus générale : c'est l'apparition d'une nouveauté, produisant une rupture dans les fonctionnements du système et ayant une spatialité et une temporalité. L'arrivée de l'électromobilité ou le développement d'un réseau de TCSP dans une ville sont ainsi pour ces auteurs autant d'innovations, de changements demandant à la ville un fort degré de résilience adaptative et transformative.

L'intégration de la spatialité urbaine en matière de résilience a été entamée par la prise en compte des réseaux techniques de la ville, sous la suggestion des recherches sur la résilience dans les réseaux complexes. Ces dernières possèdent une longue tradition, depuis l'article fondateur d'Albert et al. (2000). Le centre de ces recherches est en tout cas toujours la résilience en tant que persistance de l'intégrité d'un réseau (réseau de télécommunications, réseau de transport, réseau social) face à une

attaque externe. On étudie ainsi de quelle manière un réseau reste fonctionnel, en demeurant complètement connecté, sous différents scénarios de perturbations (attaques ciblées, défaillance aléatoire, etc.). Appliquant ces concepts aux cas des réseaux de la ville, Lhomme (2012), ainsi que Toubin et al. (2012) soulignent la nécessité de prendre en compte l'interconnexion entre les nombreux réseaux techniques (transports, eaux, énergie, télécommunications). Interdépendances et effets dominos en cas de perturbation débilante sont également identifiés par Voiron-Canicio et Dutozia (2017).

La spatialité de la morphologie urbaine est plus spécifiquement intégrée dans les analyses de la résilience configurationnelle, dont les bases sont posées par Hillier (1996), mais qui a été surtout développée en Italie et en Suède : Cutini (2013), Cutini et Di Pinto (2015), Esposito et Di Pinto (2015), Koch et Miranda Carranza (2013), Marcus et Colding (2014), Abshirini et Koch (2017).

Marcus et Colding (2014) proposent une tentative ambitieuse de relier les analyses configurationnelles de la syntaxe spatiale aux approches de la résilience de Holling. Leurs analogies ne me semblent en revanche pas très convaincantes. Le parallèle entre les fonctionnements des écosystèmes et celui de la ville devient parfois caricatural et parvient même à des apories (comme lorsque les auteurs doivent admettre qu'un haut niveau de redondance semble favoriser l'auto-organisation mais, en même temps, mettre en danger la mémoire du système, mémoire réduite à la possibilité d'isoler des sous-espaces urbains des perturbations externes !). Ces auteurs soulignent en revanche une perspective essentielle : une meilleure connaissance des propriétés morphologiques qui confèrent une résilience accrue à la ville permettra de contrecarrer des trajectoires de développement indésirables, donnant au projet des formes (le *design*) un rôle central dans la construction de la résilience urbaine.

En réalité, dès les origines de la syntaxe spatiale, Hillier (1996) avait posé les bases de ces analyses, en identifiant la configuration des réseaux viaires (plus précisément des lignes visuelles) comme une interface majeure du fonctionnement socioéconomique de la ville. Un autre concept clé vient des réflexions sur les relations inter-scalaires des propriétés configurationnelles. La synergie est définie par Hillier comme étant le degré de dépendance des propriétés configurationnelles locales par rapport aux mêmes propriétés évaluées globalement dans l'espace urbain. Si, par exemple, les valeurs d'intégration locale¹⁵ sont fortement corrélées aux valeurs globales, alors des modifications locales des réseaux auront des répercussions limitées sur les propriétés configurationnelles de la ville dans son ensemble et de chaque élément du réseau.

Sur ces bases, **différentes recherches ont permis de mieux cibler ce qui pourrait être propre à la résilience urbaine dans une approche configurationnelle**. Ces recherches continuent néanmoins à se situer dans un contexte de perturbation externe du système morphologique urbain, d'étudier sa capacité à assurer ses fonctionnements suite à cette perturbation débilante, mais n'abordent pas la dimension du changement sociotechnique, inévitable dans une démarche de géoprospective urbaine.

La perturbation débilante est une crue dans Esposito et Di Pinto (2015), un tremblement de terre dans Cutini (2013), une éruption volcanique dans Cutini et Di Pinto (2015), l'effondrement des ponts et des ensembles de coupures ciblées du réseau dans Abshirini et Koch (2017). Par rapport à la seule persistance de la connectivité du réseau, des ensembles de propriétés configurationnelles sont évaluées avant et après la perturbation. Ainsi, Cutini (2013) et Cutini et Di Pinto (2015) proposent de suivre trois propriétés configurationnelles : la synergie (définie comme dans Hillier 1996), la connectivité moyenne et un indice d'intermédiarité relative, appelé indice de fréquence (rapport entre

¹⁵ La propriété configurationnelle de l'intégration a été présenté dans la Section 3.4.

l'indice de choix maximal dans la configuration et le nombre maximal théorique de chemins minimaux dans une configuration de n éléments). La résilience configurationnelle augmenterait corrélativement à l'augmentation de la synergie et de la connectivité moyenne, et à la diminution de l'indice de fréquence (car, dans ce cas, la configuration est moins dépendante d'un seul élément à très forte intermédiarité). Koch et Miranda (2013) proposent deux autres propriétés configurationnelles pour mesurer la résilience, propriétés qui seront finalement utilisées par Abshirini et Koch (2017) à l'échelle d'une ville : la similarité et l'identité (*sameness*). Si, après perturbation, la configuration du réseau viaire d'une ville maintient la même emprise spatiale du réseau d'avant-plan (similarité) et la même constitution de ce réseau en termes d'éléments qui le composent (*sameness*), alors la configuration est considérée comme étant résiliente face à la perturbation.

Comme on le voit, et comme admis par ces auteurs, la résilience est toujours évaluée en termes de persistance de certaines structures face à une perturbation. La transformation de la configuration est vue comme un manque de résilience, surtout dans la mesure où on évalue un comportement à court terme, suite à une perturbation, et pas un potentiel de réadaptation/transformation suite à un changement permanent.

Des auteurs comme **Alexander et Salingaros abordent la résilience morphologique de manière plus générale et par rapport à des changements permanents que la ville doit pouvoir absorber**. Ils perdent en revanche le caractère opérationnel des démarches analytiques issues de la syntaxe spatiale. Cette position est bien résumée dans Mehaffy et Salingaros (2013). Le point de départ est toujours l'observation de ce qui rend les écosystèmes et les autres systèmes biologiques résilients :

1. Ces systèmes ont une structure réticulaire hautement interconnectée.
2. Ils présentent beaucoup de diversité et de redondance et ne ciblent pas l'efficacité.
3. Ils montrent une grande articulation de structures sur toutes les échelles, à partir des plus fines.
4. Ils ont la capacité de s'adapter et de s'auto-organiser.

Une réflexion particulière concerne la multiplicité des échelles : la distribution des structures sur toutes les échelles est d'abord fondamentale car elle est une forme de diversité. De surcroît, les éléments d'échelle plus fine constituent et soutiennent ceux des échelles plus grandes, facilitant leur régénération et adaptation. Il est ainsi plus simple de remplacer les cellules mortes d'un tissu, que le tissu dans son ensemble. Il y a également une relation entre les dimensions spatiales et les dynamiques temporelles (Salingaros 2005) : les éléments d'échelle plus fine évoluent plus vite et s'adaptent ainsi plus rapidement aux changements de contexte, les plus grandes composantes du système ont en revanche des dynamiques plus lentes (c'est bien la différence entre les espèces avec stratégie de reproduction r et K identifiées par Holling). Sans un nombre suffisamment grand de petites composantes, l'écosystème n'est pas capable de réponses rapides et perd à la fois en adaptabilité et en transformabilité.

Mais celle des écosystèmes n'est qu'une analogie pour Mehaffy et Salingaros. Une formulation précise des caractéristiques de la résilience urbaine est proposée. Elle fait la part belle aux propriétés de complexité structurelle de la forme urbaine, que nous avons présentées dans le Chapitre 3. Ainsi, les villes résilientes présenteraient les caractéristiques suivantes :

- 1) Elles possèdent des réseaux interconnectés de parcours et de relations, ne sont pas ségréguées dans des catégories nettes d'usage, de type ou de parcours qui les rendraient vulnérables à la défaillance.

2) Elle ont une diversité et une redondance d'activités, types architecturaux, objectifs, fonctionnements et populations. Dans cette diversité réside le potentiel de la résilience au changement (qui ne peut pas être connu en avance).

3) Elles ont une grande distribution d'échelles dans leur structure, de la structuration régionale aux détails les plus fins de la composition urbaine. Combinant cette observation avec les deux points précédents, on obtient des structures diverses, interconnectées qui peuvent être transformées aisément et, surtout, localement, en réponse à des besoins changeants.

4) Les villes et leurs composantes réticulaires, parcellaires, bâties et tissulaires peuvent s'adapter et se réorganiser en réponse au changement sur différentes échelles spatiales et temporelles, et en réponse aux changements entre elles. En d'autres termes, elles peuvent s'auto-organiser et ne tombent pas dans des états dysfonctionnels nécessitant de réinitialiser tout le système morpho-fonctionnel sur une vaste échelle (un quartier entier ou même un secteur métropolitain). Le processus d'auto-organisation peut même s'accélérer par l'échange d'information et la transformation des connaissances traditionnelles sur l'interaction entre besoins humains, contraintes ergonomiques et contraintes environnementales.

La diversité des échelles permet également aux réponses de pouvoir s'effectuer à plusieurs niveaux. Normalement la ville utilise le changement disruptif pour définir une échelle pivot de réponse, mais les relations inter-scalaires permettront d'articuler cette réponse à toutes les échelles. Par rapport à ce constat, j'observerai uniquement que les réponses les plus fines, celles des acteurs individuels de bâtir une nouvelle parcelle (et comment) ou de restructurer un bâtiment existant, d'ouvrir ou de fermer une activité économique, etc. sont celles qui constituent l'essentiel des réponses autonomes des acteurs. Le changement de l'infrastructure morphologique ou la construction de grands équipements nécessite en revanche de la coordination, par la culture ou par le projet et, dans les deux cas, un passage d'information entre les acteurs. Finalement, pour Mehaffy et Salingaros, les villes résilientes évoluent en gardant l'essentiel du contenu structurel et informationnel précédant, tout en étant capables de répondre au changement en introduisant de la nouveauté. Mais il ne s'agit presque jamais de nouveauté totale, car on introduit seulement l'innovation strictement nécessaire à une structure qui a passé l'épreuve du temps. Toute nouveauté est testée par la sélection, comme dans la nature. Cela exclut les changements les plus drastiques et discontinus car les villes résilientes sont à préservation de structure (*structure-preserving*) même face à des profondes transformations.

Quel urbanisme pour la ville résiliente et antifragile ?

La perspective posée par Bleicic et Cecchini (2016) d'un urbanisme pour la ville hautement résiliente et antifragile est différente de celle de Taleb (2007, 2012). Taleb en effet pose la question de la prise de décision antifragile en contexte hautement incertain, du fait de la complexité du système. Comment décider d'une stratégie d'investissement, d'une perspective de carrière, etc. dans un système complexe, dont je n'ai qu'une compréhension de principe et pour lequel je ne peux pas prévoir la survenue du changement radical ? La décision de l'acteur est celle du projet qui se pose dans la complexité. Mais le projet d'une entreprise ou d'un particulier est toujours définissable par un petit nombre d'objectifs à atteindre, il est téléologique. Le projet pour les systèmes sociaux à vocation universelle, comme un pays ou une ville, n'est pas téléologique. La ville se doit d'être antifragile face aux incertitudes de son environnement externe et de ses propres dynamiques sans avoir un objectif particulier à poursuivre. Si nous reconnaissons à l'auto-organisation interne hautement structurée la capacité de rendre le système antifragile et résilient, **il ne s'agit plus seulement d'un projet dans la**

complexité, mais d'un projet pour la complexité : la complexité n'est pas seulement le contexte de l'action, elle est de façon tout-à-fait générique son but.

L'urbanisme pour la ville résiliente et antifragile doit donc catalyser l'auto-organisation du système et la faire tendre vers l'atteignement des propriétés structurelles identifiées par Mehaffy et Salingaros. On peut ainsi identifier une série d'interventions permettant de faciliter les dynamiques auto-organisatives de la ville : les actions visant à mailler et interconnecter le réseau viaire, celles visant à fractionner le pavage parcellaire, à faciliter la mixité fonctionnelle du bâti et à faciliter la coordination des bâtiments, des rues et des parcelles ; ces actions devront être prioritaires surtout là où une intervention d'échelle plus grande (la localisation d'un grand équipement) vient perturber une situation initiale (la démultiplication des petits éléments permet de mieux y répondre)¹⁶. Les plus gros projets devraient concevoir dès le début une certaine réversibilité et réadaptabilité par composantes.

On peut plus facilement, par la *via negativa*, identifier les interventions à éviter. *A priori* il s'agit de la spécialisation fonctionnelle, des systèmes de règles interdisant toute évolution spontanée et des projets dont les éléments correspondraient seulement à une échelle précise. Un point de convergence entre les réflexions générales de Taleb (2012) et celles plus spécifiques de Bleicic et Cecchini (2016), Voiron-Canicio (2014) et Mehaffy et Salingaros (2013) est le refus de l'optimisation : un système hautement résilient et antifragile n'est pas optimisé, mais montre une certaine redondance (forcement suboptimale et pouvant être perçue comme un gaspillage de ressources) permettant de mieux s'adapter au changement. Toute intervention visant à optimiser un système complexe par rapport à un objectif donné (utilisation la plus efficace d'une certaine ressource, maximisation d'une certaine performance, résistance par rapport à un aléa précis, capacité à répondre à un changement particulier) induit une fragilisation par rapport aux autres changements qui n'ont pas fait l'objet de l'optimisation. La théorie HOT (*Highly Optimized Tolerance*, Carson et Doyle 2000) montre, par exemple, que le design peut rendre un système particulièrement robuste à un certain type de perturbation relativement fréquente, mais le fragilise ainsi faisant à ce que Taleb appellerait des cygnes noirs, rendant de ce fait plus probables d'autres types d'instabilités.

Sur ces bases, Salingaros (2005) parvient à une position apparemment très proche de Moroni (2015) : pas de plan rigide pour la localisation des activités (zonage), mais un ensemble de règles pour guider l'auto-organisation du système. Or, contrairement à Moroni, les règles invoquées par Salingaros sont informées de la connaissance de la complexité structurelle demandée à la ville résiliente. Il s'agit d'une connaissance de principe, au sens d'Hayek, mais elle permet néanmoins d'identifier les grandes lignes d'une organisation spatiale et d'une forme souhaitable : interconnexions, diversité, redondance, relations trans-scalaires en loi de puissance, etc. L'essentiel de ces propriétés est le produit de l'auto-organisation, mais les règles doivent être conçues pour faciliter et pas pour être neutres (ou encore pire pour contrarier) ces objectifs.

Salingaros reconnaît la nécessité de ce que j'appellerais des « formes à haut potentiel de changement », changement physique et changement fonctionnel et voit la possibilité de guider leur génération par un système de règles. Cependant il ne prend pas en compte la dialectique entre infrastructure morphologique (réseau viaire et trame parcellaire, à plus grande inertie temporelle) et superstructures (bâti et espaces vides). Sa toile urbaine (Section 3.5) est conçue dans une approche

¹⁶ Salingaros (2005), Alexander et al. (1977) et, avant eux, déjà Jacobs (1961) soulèvent le problème des interventions massives des grands projets (publics ou privés). Alexander suggère qu'un grand projet devrait toujours prévoir comme complément des enveloppes financières équivalentes pour quelques projets moyens et pour une multitude de petits projets individuels, permettant aux acteurs urbains de reconfigurer le quartier en réponse au grand projet.

morpho-fonctionnelle (forme des tissus, configuration et fonctions), qui pourrait être le produit émergeant de décisions individuelles prises par les acteurs dans un système de règles appropriées. Mais comment concevoir une infrastructure morphologique susceptible d'accueillir des multiples solutions morpho-fonctionnelles ? Encore une fois, la coordination des acteurs individuels, par la culture ou par le projet s'impose comme une nécessité.

Dans l'arsenal des solutions de projet compatibles avec la complexité structurelle de la ville, Salingeros fait référence au **langage des patrons** (*pattern language*) de C. Alexander. Dans « *A pattern language* » (Alexander et al. 1977) et « *A new theory of urban design* » (Alexander et al. 1987), Alexander propose des solutions opérationnelles pour l'architecte et l'urbanisme souhaitant intervenir sur la ville complexe. Alexander pose la question de la génération de formes aptes à répondre à des besoins fonctionnels identifiés, sans perdre de vue leur contribution à la solution d'autres problèmes morpho-fonctionnels, en passant par une méta-modélisation du problème (les *patterns*). Un *pattern* est une solution mise au point au cours du temps pour répondre à un besoin au sein d'un système. L'approche des *patterns* peut être vraiment transversale à différents domaines de connaissance. D'autres domaines disciplinaires ont développé l'approche du *pattern language*, notamment les sciences informatiques (dans le développement du code de systèmes logiciels complexes), mais également la médecine, la pharmacologie ou la psychologie, qui ont dû partir d'une grande base de connaissance phénoménologique de solutions-type avant de pouvoir systématiser ces connaissances par des approches plus théoriques.

Plus particulièrement, les *patterns* urbanistiques et architecturaux sont des solutions de forme physique, sédimentées par les sociétés humaines au cours de millénaires. De ce point de vue, ils ne sont pas sans rappeler les types architecturaux et les tissus urbains typiques. Mais si ces types sont historiquement et culturellement situés, les *patterns* ressemblent davantage à une collection des meilleures solutions trouvées au cours de l'histoire (au moins dès qu'un problème se présentait historiquement) à des problèmes types. Les *patterns* sont préscientifiques (ce qui leur vaut un certain nombre de critiques) : avant d'être prouvés par une démarche analytique qu'opérationnalise une théorie scientifique, les *patterns* sont d'abord fondés sur l'observation phénoménologique du succès des solutions qu'ils offrent. Dans la pratique, le *pattern language* répond à un double problème : c'est d'abord une manière de comprendre et possiblement de contrôler un système complexe, et c'est ensuite un outil nécessaire à la conception de solutions structurellement et fonctionnellement cohérentes tirant profit de l'expérience accumulée par les réponses données dans le passé aux mêmes problèmes. Les solutions types identifiées par Alexander ont été mises à l'épreuve du temps (siècles et parfois millénaires) et sont vraisemblablement moins fragiles que celles proposées par les approches cartésiennes du mouvement moderne (qui inévitablement, pour optimiser un aspect fonctionnel à une échelle donnée oublie la multitude de relations complexes inobservées) l'assonance est forte avec l'approche de l'antifragilité par le temps, proposée par Taleb (2012) et Mandelbrot (1982).

Alexander et al. (1977) proposent ainsi un ensemble de 253 *patterns* pour des solutions de projet allant du détail architectural aux plus grandes composantes de la forme urbaine (les limites des secteurs urbains, les grands équipements, etc.). Salingeros (2005) souligne que le message le plus important du travail d'Alexander n'est pas la collection de *patterns* (certains sont questionnables, d'autres pourraient trouver des meilleures solutions au cours du temps), mais le fait que les *patterns* possèdent des interconnexions qui permettent des assemblages plus ou moins complexes. Le *pattern* « comment créer un front bâti sur la rue, susceptible d'animer l'espace public de la rue » a par exemple une connexion avec le *pattern* « comment créer une limite de bâtiment gaufré et crénelé, abritant des

nœuds piétons et des activités ouvertes au public », posant des contraintes sur la conception des bâtiments qui concourent à composer le front bâti. C'est l'existence des connexions qui permet de parler d'un *pattern langage* et pas seulement de collection de *patterns*, car ces derniers ne constituent que le vocabulaire d'une langue faite de connexions logiques multiples entre ses constituants élémentaires.

Plus particulièrement, l'assemblage des *patterns* se fait en deux dimensions. Horizontalement, à la même échelle spatiale d'intervention, plusieurs *patterns* s'impliquent réciproquement pour apporter ensemble une solution à un problème plus complexe (par exemple les différents *patterns* concourant à la composition du bâtiment ou à la structuration du quartier). Verticalement, chaque élément urbain ou architectural étant à son tour un système d'éléments plus menus et concourant à composer des systèmes plus vastes, un *pattern* doit établir des connexions vers ceux de taille immédiatement inférieure et supérieure. C'est le système de ces connexions horizontales et verticales qui permet à un ensemble de *patterns* d'offrir des solutions cohérentes et robustes à la production de formes urbaines et architecturales. En même temps, le non-respect d'un ou plusieurs *patterns* (ou pire l'adoption d'anti-*patterns*) à un certain niveau, perturbe le fonctionnement des autres *patterns*, même si le système des *patterns* dans leur ensemble est capable d'une certaine résilience. La prise en compte de l'ensemble cohérent, intra-scalaire et inter-scalaire des *patterns* employés permet d'avoir une vision holistique du système urbain produit, où certaines propriétés de l'ensemble (cohérence, résilience, richesse informationnelle) découlent d'avantage des interconnexions multiples entre les *patterns* que des *patterns* pris individuellement.

On remarquera aussi que, d'un point de vue épistémologique, l'approche du *pattern langage* n'est pas une théorie positive des transformations urbaines, mais plutôt une théorie normative de solutions optimales à implémenter. Même si un argument en faveur des *patterns* est celui de son utilisation dans le passé, surtout dans le cadre des contextes urbains traditionnels, Alexander n'affirme pas que les *patterns* identifiés aient toujours régi les transformations urbaines et architecturales au cours de l'histoire. Il est même fait état de réalisations (surtout au cours du XX^e siècle, notamment sous l'influence du mouvement moderne en architecture et en urbanisme) d'anti-*patterns* ayant été intégrés dans la pratique professionnelle et même dans les préconisations réglementaires d'urbanisme.

Finalement, comme le reconnaît également **Salingaros (2005) le langage des patrons est la meilleure approche que l'humanité a pu mettre au point pour comprendre, intervenir sur, et éventuellement contrôler, un système complexe auto-organisé d'artefacts.** Pour les disciplines du « design » (architecture, urbanisme, sciences informatiques, etc.) elle est également une nécessité pour produire des interventions fonctionnellement et structurellement cohérentes avec l'ensemble du système pour lequel elles sont conçues. Le développement d'approches analytiques des systèmes de *patterns* d'Alexander me semble une contribution précieuse que notre communauté scientifique peut apporter pour corroborer ou invalider ces propositions.

Ébauche de géoprospective urbaine de long terme par via negativa et enjeux de connaissance

Que retenir de ces différentes suggestions pour la ville résiliente et anti-fragile ? Je propose une possible synthèse par une **ébauche de géoprospective morphologique de la ville sur un temps long par via negativa**. Il s'agit ici d'un exercice purement qualitatif, qui interpelle des projets de recherche plus analytiques pour corroborer (voire remettre en discussion) ceux qui ne sont, à ce stade, que des hypothèses. L'exercice répond à la demande suivante : **quelles formes urbaines auront les villes dans**

un siècle et quelles stratégies d'intervention sont concevables dès aujourd'hui dans cette perspective ?

Sur cet horizon, il n'est pas possible de procéder par extrapolation du plus vraisemblable à court terme en faisant, par exemple, l'hypothèse de la poursuite du type de nouvelle urbanisation observée au cours des deux-trois dernières décennies. Trop de bruit pollue notre vision du futur au fur et à mesure que la réflexion s'éloigne dans le temps, d'autant plus que la probabilité augmente pour la survenue de changements disruptifs (les cygnes noirs), mettant en crise les formes les plus fragiles. Il est également impossible de prévoir les nouvelles formes qui pourront les substituer (et qui risquent d'être à leur tour fragiles). Ne nous aventurons pas alors à spéculer sur les formes du futur, toute hypothèse serait hautement fragile. Procédons par la *via negativa* en soustrayant à la ville d'aujourd'hui tout ce qui, très probablement, est voué à disparaître. Nous pouvons en effet porter notre raisonnement sur la fragilité des formes existantes : quelles sont celles plus ou moins susceptibles de résister aux changements futurs ?

Les formes les plus anti-fragiles sont celles susceptibles de s'adapter et de se transformer, même si en général c'est le système morphologique urbain qui doit être anti-fragile, des formes particulières pouvant être fragiles. Je me limiterai ici à raisonner sur les tissus urbains (le même pourrait être dit des configurations). Comme j'ai déjà remarqué, les tissus urbains ne sont pas des objets périssables, mais des arrangements de rapports spatiaux ayant un contenu informationnel (ils pourraient être assimilés à des *patterns* au sens d'Alexander). Des bâtiments peuvent être remplacés, d'autres modifiés, quelques parcelles fusionnées ou démembrées... le tissu gardera encore son identité.

On peut considérer la durée de vie déjà observée pour les différentes formes tissulaires. Les plus anciennes, les réseaux maillés irréguliers avec alignement et mitoyenneté et grand fractionnement du bâti et du parcellaire, sont celles susceptibles de perdurer le plus longtemps. On les observe, sous différentes variantes, depuis plusieurs milliers d'années (depuis Mohenjo Daro et Jéricho). Viennent ensuite les tissus maillés plus réguliers, au bâti continu et aligné et aux rues de plus grand gabarit, produits après la révolution industrielle. Les plus anciens ont déjà deux siècles d'histoire (et il y a même des exemples prémodernes), ils ont absorbé l'arrivée de l'industrie dans la ville, accueilli des nouveaux bâtiments spécialisés, montré une certaine capacité à accueillir le tramway d'abord et l'automobile ensuite, des fonctions et des populations différentes. Ces deux formes tissulaires se caractérisent également par une grande richesse d'espaces publics (les éléments morphologiques les plus souples en termes d'usages possibles et à plus haut potentiel de catalyse d'interaction sociale). Elles seront vraisemblablement là, avec quelques modifications, dans cent ans.

Que pouvons-nous présager pour les tissus pavillonnaires arborescents, ou pour les concentrations de grands équipements spécialisés, très récents (moins d'un demi-siècle) et issus d'une optimisation (minimisation du réseau de desserte et optimisation de l'attractivité résidentielle pour des familles motorisées avec enfants pour les premiers, optimisation fonctionnelle pour les seconds) ? Il est vraisemblable qu'ils ne résisteront pas à quelques choc futur (choc énergétique ? raréfaction des sols constructibles ? obsolescence des fonctions pour lesquelles l'optimisation avait été conçue ? nouvelles pratiques socioculturelles dans les fonctionnements urbains ? changements socio-démographiques comme le vieillissement et l'augmentation de la diversité des populations urbaines ?). D'où la nécessité pour l'urbaniste de prévoir les modalités de leur adaptation/transformation en reconnaissant le potentiel de chacune de ces formes tissulaires. Les tissus périurbains se caractérisent ainsi par la grande multiplicité d'initiatives individuelles facilement mobilisables (chaque ménage pouvant aménager sa parcelle de manière relativement flexible si les règles d'urbanisme le lui permettent), pourraient même être particulièrement aptes à certains scénarios (par exemple celui de la production

énergétique distribuée). Reste le frein de l'infrastructure morphologique qui n'est pas très connective, notamment le réseau viaire qu'il faudra recoudre et le système d'espaces publics qu'il faut créer. Les grands équipements et les concentrations monofonctionnelles (quartiers des affaires, campus universitaires, grands hôpitaux, zones d'activité, etc.) sont les plus fragiles car il ont les plus faibles capacités d'auto-organisation. Il devient nécessité ici de faire sauter les règles ayant régi la conception de ces fragments urbains en introduisant le fractionnement des lots et des parcelles, la souplesse morphologique (possibilité de la part des acteurs individuels de modifier les formes bâties et les fonctions abritées), la promiscuité des usages, la réversibilité des fonctions ... tout en travaillant sur l'interconnexion des réseaux viaires et la création d'espaces publics.

Au niveau tissulaire, une question de fond est également l'articulation spatiale entre les régions morphologiques. Une aire métropolitaine proposant une multiplicité de régions morphologiques plus traditionnelles bien réparties au sein d'une grande diversité de formes périurbaines et de tissus discontinus modernes serait plus résiliente et antifragile par rapport à un seul centre-ville traditionnel noyé dans un vaste espace périurbain qui serait à son tour relativement homogène d'un point de vue spatial. Le risque ici est que des pans entiers de la ville puissent devenir obsolètes et soient incapables de s'auto-régénérer en profitant de la présence de fragments urbains plus résilients à proximité.

La réflexion peut devenir également morpho-fonctionnelle. En termes de mobilité, par exemple, quels modes seront utilisés d'ici un siècle et, surtout, si nous devons intervenir sur la ville d'aujourd'hui, quelles interventions infrastructurelles seront moins fragiles aux aléas des technologies disruptives de demain ? Faut-il concevoir des formes urbaines de manière à favoriser une technologie de transport en particulier ? De ce point de vue, il est tout-à-fait légitime de réfléchir sur l'échelle d'un siècle, car une morphologie urbaine conditionnera les fonctionnements de la ville bien au-delà des horizons habituels des projets de transport (20-30 ans).

Les prospectivistes classiques réfléchiront ici à la maturation des technologies qui sont déjà en cours de développement aujourd'hui, de l'électromobilité à la voiture autonome. Les urbanistes ont souvent critiqué l'automobile et ont vu dans l'épuisement du pétrole sa fin proche, mais l'automobile a l'avantage d'une grande souplesse (à partir du fait qu'il s'agit d'une technologie mobilisable par les individus), possède plus d'un siècle d'histoire et les nouvelles technologies peuvent lui donner une nouvelle vie. Mais on pourrait aussi bien faire l'hypothèse que des transports en commun innovants puissent bénéficier de nouvelles révolutions technologiques (bus autonome, *hyperloop*, etc.) et remplacer l'automobile dans un contexte de pénurie de sources d'énergie.

Réfléchir sur un siècle est vraiment un défi et la prospective technologique à ces horizons, a ses limites. Ratti (2017) relate que le Boston Globe avait publié un numéro spécial en décembre 1900 proposant un scénario pour la ville des années 2000 : la mobilité des personnes et des marchandises y était désormais assurée uniquement par des dirigeables et par la poste pneumatique, les trottoirs avaient été substitués par des tapis roulants, les rues, finalement inutiles, étaient devenues des parcs ou abritaient des bâtiments. On peut sourire à la facilité par laquelle les technologies naissantes de la décennie écoulée pouvaient obnubilier la réflexion des contemporains, rendant leur scénario fragile à tout changement du contexte sociotechnique. Mais comment éviter de tomber dans le même piège ? Nous pouvons à nouveau revenir à la *via negativa* et à l'effet Lindy : le mode de transport qui a été présent tout au cours de l'histoire plurimillénaire de la ville est la marche et il est sûr que nous continuerons à marcher dans nos villes d'ici un siècle (n'en déplaise aux lecteurs de *science-fiction*). Tout investissement sur les infrastructures qui permettent le mouvement piéton (trottoirs, places, promenades, etc.) seront les moins fragiles dans tout scénario de géoprospective urbaine, tout urbanisme facilitant le mouvement piéton sera le moins fragile face aux inconnues du développement

sociotechnique. De surcroît, ces interventions, favorisant le maillage des rues, la connectivité, la coordination entre façades des bâtiments et trottoirs, et les échelles les plus fines de l'organisation de l'espace urbain, sont celles qui favorisent déjà la résilience dans son ensemble, permettant l'adaptation des tissus à l'insertion/élimination d'équipements plus lourds.

Pour le reste des stratégies d'intervention, on mobilisera le principe de précaution (éviter les irréversibilités), la redondance programmée, la renonciation à l'optimisation, etc. tous les principes identifiés dans les pages qui précèdent. Vraisemblablement il ne s'agit pas non plus d'interdire toute forme urbaine qui ne respecterait pas la vision que nous nous faisons aujourd'hui d'une ville résiliente et anti-fragile : la ville dans son ensemble peut et doit expérimenter (des nouveaux besoins apparaissent, des nouvelles solutions sont proposées), à condition de laisser une place de choix aux formes déjà testées par l'histoire urbaine. Les grandes villes européennes multimodales et aux formes urbaines multiples, de Berlin à Barcelone sont, de ce point de vue, relativement moins fragiles que certaines grandes villes nord-américaines tels qu'Atlanta, qui a optimisé sa forme urbaine par rapport à la seule technologie automobile.

Ma réflexion se limite à la résilience morphologique de la ville, bien d'autres considérations devront ainsi être faites en matière de résilience socioéconomique, mobilisant probablement des analyses semblables sur les caractéristiques du capital humain et des réseaux sociaux de la ville. Les deux résiliences sont par ailleurs liées, comme le montre la perte de capital social à l'occasion des opérations de rénovation urbaine (Meslin et Rousselot 2013). Cet ébauche n'est qu'un exercice très qualitatif, informés des fragilités à éviter et de quelques hypothèses pouvant les justifier. Par sa sobriété et son refus de se faire prendre au jeu de la surenchère technologique de la *smart city*, il a le mérite d'un exercice de purge intellectuelle.

Une véritable démarche géoprospective portée par les acteurs urbains peut s'en servir, mais ne peut pas s'en contenter. Et cela pour différentes raisons. D'abord parce-que, pour les acteurs, le véritable enjeu géoprospectif est : dans quelle ville souhaitons-nous nous projeter demain ? et quel degré de coordination sommes-nous prêts à accepter pour atteindre cet objectif ? Dans ce contexte, éminemment politique et sociétal, l'horizon d'un siècle n'est normalement pas usuel, mais il peut être intéressant d'informer une géoprospective à 20-30 ans de ce qui pourrait être légué à nos arrière-petits enfants d'ici un siècle et qui pourrait, par-là, donner un sens aux choix effectués par notre génération.

Ensuite, parce-que la demande d'expertise qui nous sera formulée en tant que scientifiques, ira nécessairement au de-là de ces considérations de principe. Le géographe et l'urbaniste devront pouvoir fonder les hypothèses ici esquissées avec des recherches analytiques permettant de décliner plus précisément ce que l'on sait et ce que l'on ne sait pas (ou ce que l'on sait seulement de manière incertaine) sur le potentiel des différentes formes urbaines et sur les relations morpho-dynamiques qui les lient aux fonctionnements de la ville. **Différents enjeux de connaissance peuvent être identifiés.** Quelle est la validité empirique des théories proposées par Salingaros, Hillier ou Alexander pour la résilience morphologique de la ville ? Comment pouvoir insérer ces connaissances de principe, qualitatives et seulement partiellement validées par des démarches analytiques ? En particulier, quelles caractéristiques tissulaires, configurationnelles ou des paysages perçus permettent de mieux répondre aux enjeux de la mixité fonctionnelle et sociale dans un contexte métropolitain ? Comment caractériser le potentiel des différentes formes urbaines pour l'absorption du changement sociotechnique au-delà de la seule approche Lindy et de la *via negativa* ? Y-a-t-il des caractéristiques tissulaires et configurationnelles susceptibles de catalyser certains changements de la forme et pas d'autres ? Quels paramètres permettent d'identifier plus précisément les fragments urbains incapables

de s'adapter et de se transformer de manière autonome ? Quelles interventions seront plus à même d'augmenter la résilience globale de la ville, et celle de ses différentes composantes ? Quels seront les domaines d'applications les plus pertinents pour les modélisations probabilistes, possibilistes ou en théorie des évidences concernant les incertitudes de ces éléments de connaissance ? Quels formalismes peuvent être explorés pour les situations d'incertitude plus profonde, qui semblent tant caractériser les démarches géoprospectives ? Quelles méthodes, quels modèles, quels jeux de données pourront être mobilisés pour donner des réponses adéquates à ces besoins de connaissance ? Qui plus est, toutes ces questions devront être déclinées sur les espaces urbains de projet et le raccord devra être fait entre des connaissances génériques sur la ville contemporaine et d'autres beaucoup plus spécifiques, caractérisant les villes sur lesquels se portera l'effort géoprospectif.

Ces enjeux de connaissances devront être abordés par un agenda de recherche qui reste à accomplir : identifier des nouvelles stratégies, corroborées par les plus récentes recherches sur la complexité de la spatialité urbaine, pour **intervenir avec « modestie épistémique »** sur cette dernière **et parvenir à des villes plus résilientes et, dans la mesure du possible, antifrangiles.**

La modestie épistémique est en effet la reconnaissance des limites de nos connaissances scientifiques, mais nous avons néanmoins besoin de savoir ce qu'il est mieux de faire ici, aujourd'hui. C'est toute la tension cognitive du passage disciplinaire de la géographie urbaine à l'urbanisme. Nous devons reconnaître l'existence de différentes connaissances propres à ces deux disciplines.

Connaissance, conscience et résilience urbaine

Dans l'Étique à Nicomaque, Aristote (2004 dans la traduction de Richard Bodéüs) articule sa théorie de la connaissance autour de trois concepts : *épistémè*, *techné* et *phronesis*. Dans la Section 1.2 nous nous sommes particulièrement intéressé à la connaissance scientifique, l'*épistémè*, tout en reconnaissant qu'il ne s'agit pas de la seule connaissance possible et qu'elle ne possède pas nécessairement le caractère de certitude que lui attribue Aristote. La *techné* est la connaissance pratique que les humains ont d'accomplir certaines activités : dès l'antiquité c'était la connaissance de l'artisan et de l'architecte, voire du médecin et du paysan. Elle n'a pas la prétention à atteindre les universels de l'*épistémè*, peut rester tacite et se fonde sur la reconnaissance d'une efficacité plus que sur une logique de vérité. La *phronesis* est la connaissance du bon comportement à avoir et de la bonne action à entreprendre dans le bon contexte, elle demande une grande empathie au contexte des autres humains et renvoie également à la dimension éthique de l'agir humain. La science, la praxis technique et l'action politique relèvent clairement de ces trois domaines de la connaissance. Or, ces trois domaines concourent tous à la démarche de géoprospective urbaine souhaitant déboucher sur une intervention concrète sur la ville. Il convient dès lors de s'interroger sur le rapport entre ces trois types de connaissance.

Selon la vision classique de la science positiviste, l'*épistémè* doit venir éclairer et fonder la *techné* et la *phronesis*, qui ne deviennent qu'une application de l'*épistémè*. Plus qu'une fondation, on a historiquement observé une véritable refondation, dans la mesure où des savoirs techniques et procéduraux plus traditionnels ont été remplacés par ceux qui pouvaient être dérivés de l'application de la connaissance scientifique. La capacité à maîtriser l'énergie nucléaire ou à envoyer un homme sur la Lune ont donné une primauté apparemment indiscutable à la connaissance scientifique comme base de la technique et de l'action. Il s'agit d'une vision liée à la modernité car, si Aristote a placé très haut son *épistémè* (connaissances universelles reconnues vraies), il reconnaissait également l'indépendance et la valeur propre de la *techné* et de la *phronesis*, qui n'étaient pas subordonnés à la connaissance savante.

D'un point de vue historique, la remise en discussion de ce paradigme sociétal vient également des ratés de la technique à base scientifique lorsqu'elle est intervenue sur des systèmes complexes. DeLeon (1988) et Dryzek (1993) remarquent ainsi comment la remise en discussion de ce paradigme en aménagement va de pair avec les premiers ratés de l'urbanisme moderne (qui, probablement à tort, se justifiait du fait de l'application de principes scientifiques à ses solutions techniques) mais, encore plus, de l'échec américain dans la guerre du Vietnam, le premier conflit qui se voulait programmé sur la base de principes scientifiques, mais qui n'avait pas réussi à saisir la complexité du système socio-culturel vietnamien et du plus vaste système géopolitique régional. Les grands enjeux du changement climatique aujourd'hui contribuent à cette remise en discussion et suggèrent de remettre au centre des stratégies d'intervention les incertitudes des connaissances scientifiques et la complexité des relations entre anthroposystèmes et écosystèmes.

Reconnaître les limites et les incertitudes de l'épistémè en matière d'urbanisme revient alors aujourd'hui à rétablir une nouvelle dignité pour la *techné* et pour la *phronesis*. Les formes vernaculaires, les patterns d'Alexander, sont de la *techné*. Le principe de précaution, la réversibilité et la redondance programmée, le renoncement à l'optimisation, la recherche de projets partagés, sont de la *phronesis*. Une épistémè incertaine et moins arrogante devient une condition indispensable pour une réévaluation de ces types de connaissance. Même, l'épistémè peut se nourrir de recherches essayant de comprendre la valeur jusqu'à présent méconnue des techniques et des procédures traditionnelles, sans présupposer que ce qui ne rentre pas dans le cadre couramment admis des connaissances scientifiques est, de ce fait même, dépourvu de toute validité. L'approche de la pensée complexe (Morin 1990) contribue à cette nouvelle disposition de la recherche scientifique.

Origine :	Artificielle	Naturelle
Délimitation :		
Objet délimité	Complexité artefactuelle + persistance <i>machine, bâtiment, œuvre d'art</i>	Complexité biologique + adaptabilité <i>organisme</i>
Système non délimité	Complexité de systèmes d'artefacts + auto-transcendance <i>système d'artefacts, Internet, ville</i>	Complexité écologique <i>écosystème</i> + transformabilité

Figure 5.2 – Les propriétés de résilience de la complexité organisée.

Je souhaiterais revenir alors sur la centralité de la praxis du projet au sein d'une démarche géoprospective. Cela nous permet de saisir une dimension ultérieure de la résilience urbaine par rapport à la résilience générale des écosystèmes. Mon point de départ est le schéma des quatre types de complexité organisée identifiés par Marshall (2012, voir Section 2.1) : complexité artefactuelle, biologique, écologique et des systèmes d'artefacts. À ces quatre types de complexité j'attribue des propriétés de résilience qui se rajoutent progressivement (Figure 5.2). La principale propriété de résilience possédée par l'artefact est la persistance d'un fonctionnement, dans la mesure où les perturbations externes restent dans les limites des spécifications prises en compte par le projet (résilience d'ingénierie, voir également Holling 1996). Dès qu'on en sort, l'artefact complexe est incapable de continuer à fonctionner correctement. L'organisme biologique possède également un

haut niveau d'adaptabilité, par ses multiples mécanismes d'homéostasie. L'écosystème, système ouvert et non téléologique, y rajoute aussi un niveau très élevé de transformabilité : des éléments clés (espèces vivantes, composantes abiotiques, etc.) peuvent apparaître ou disparaître, l'écosystème parviendra à un nouveau fonctionnement et rentrera dans un cycle de renouvellement adaptatif (Holling 1973).

Or, qu'est-ce que la complexité des systèmes d'artefacts, qui sont toujours des systèmes sociotechniques, rajoute à ces trois propriétés de résilience ? Comme les écosystèmes, elle a recours aux trois, mais ce qui la différencie des écosystèmes est la conscience que le système peut avoir de soi et qui produit des tentatives de contrôle, toujours partiel, sur les trois propriétés. Dupuy (1992, 2012) parle à cet égard d'auto-transcendance du système : c'est précisément la conscience que le système développe de son propre état, qui permet de produire des projets et des visions partagées permettant de guider sa propre transformation face au changement. Mais, attention, il ne s'agit pas d'une intervention de l'extérieur, comme théorisé par l'urbanisme moderne : les aspirant contrôleurs font partie du système contrôlé, il n'existe pas de séparation nette sujet/objet (Morin 1990), les plans ne sont pas exogènes au système, ils émergent de lui, comme également souligné par Badariotti (2006). La conscience a été longtemps spontanée (Caniggia et Maffei 1979) et s'est codifiée dans une culture traditionnelle qui est à la fois *techné* (savoir technique) et *phronesis* (procédure décisionnelle dans un contexte). Avec l'essor de la modernité, elle est devenue une conscience critique (toujours dans Caniggia et Maffei 1979) et a senti le besoin de trouver un fondement rationnel dans sa relation avec la connaissance scientifique. Les connaissances scientifiques du XIX^e siècle ont ainsi fondé la théorie de Cerdà (1867) ou même les positions scientistes de Le Corbusier (1924, 1943). Elles ont amené à répudier les savoirs techniques et procéduraux traditionnels et ont permis de fonder le projet technocratique. La science de la complexité et la reconnaissance de l'incertitude parviennent à un nouvel équilibre *épistémè/techné/phronesis*, en reconnaissant les apports des savoirs traditionnels préscientifiques et de l'intelligence collective qui se déploie dans l'auto-organisation urbaine, sans pour autant renoncer à l'éclairage que la recherche scientifique peut apporter sur la compréhension de la ville. Dans tous les cas, **un système non téléologique en se donnant un projet à poursuivre (ou une culture à préserver) opère comme s'il avait un objectif : c'est par ce biais que les systèmes sociotechniques comme les villes coordonnent, dans certaines limites, les actions individuelles et démultiplient leur résilience.**

5.3 Un agenda de recherches morpho-dynamiques, morpho-prospectives et morpho-culturelles pour la ville

Les enjeux de connaissance soulevés dans la section précédente me permettent de structurer un agenda de recherche qui s'intégrera dans le nouveau quinquennal du laboratoire ESPACE, couvrant la période 2018-2022. Le contexte de mes actions de recherche dans le nouveau projet scientifique du laboratoire sera celui d'une importante prise de responsabilités collectives : la direction de l'équipe niçoise de l'UMR ESPACE (et par là la direction adjointe du laboratoire) ainsi que la codirection avec S. Robert de l'Axe A - « Complexité Spatiale et Trajectoires de Territoires » du nouveau projet.

Dans ce contexte, j'identifie trois principales directions pour mes recherches :

1. Une direction morpho-dynamique : l'analyse et la modélisation des relations forme-fonctionnement dans le cadre des théories de la complexité structurelle de la ville ;

2. Une direction morpho-prospective : la fondation d'une géoprospective urbaine nourrie des recherches sur la complexité urbaine et la connaissance incertaine ;
3. Une direction morpho-culturelle : l'hybridation des recherches en analyse et modélisation spatiale de la forme urbaine avec les approches de la géographie culturelle et de l'histoire urbaine.

La recherche morpho-dynamique

Cette première direction de recherche poursuit les travaux sur l'analyse et la modélisation des formes et des fonctionnements urbains présentées dans le Chapitre 3. La morpho-dynamique est néanmoins un concept plus englobant que la seule relation forme-fonctions car elle intègre à la fois les flux échangés dans la ville et les reconfigurations des formes et des fonctions dans le temps. De manière plus ambitieuse, je souhaiterais inscrire cette direction de recherche parmi les axes structurants du laboratoire ESPACE. Pour cela, j'ai conçu et porté avec Samuel Carpentier-Postel (Aix-Marseille Université) l'action « Complexité urbaine et réseaux : morphologie, modélisation, multiplicité, métamorphoses » au sein de l'axe A du prochain quinquennal d'ESPACE. De même, un certain nombre de recherches méthodologiques sur la fouille de données et l'intelligence artificielle appliquées aux phénomènes urbains participera à l'action « Données massives, modélisation et intelligence artificielle (DAMIA) » qui participe à l'axe B du futur quinquennal « Méthodologie des spatialités ». Je peux identifier une série d'objectifs plus spécifiques que je souhaite donner à ces recherches, et qui nécessiteront, chacun, la coordination de petits collectifs de collègues au sein de projets de recherche ciblés.

1. **Renouveler la recherche morpho-dynamique par le croisement des différents registres de la forme urbaine** et, plus en particulier, ceux des formes des tissus, des formes perçues, des configurations.

La convergence des registres de la forme urbaine était déjà identifiée par Lévy (2005) comme nécessaire pour faire progresser l'agenda de la recherche morphologique sur la ville. Or, cette convergence est d'autant plus nécessaire lorsque le chercheur souhaite comprendre les logiques spatiales des dynamiques urbaines (flux, localisation des activités, fonctionnements du marché immobilier, animation des espaces publics, etc.).

À présent, mes recherches sur le lien entre localisations commerciales (et dynamiques de localisations commerciales) et formes urbaines visent précisément à **coupler l'analyse configurationnelle** (déjà explorée dans le cadre du projet PREDIT DAMA, cfr. Section 3.7) **avec la mise en contexte dans la forme des tissus visibles par le piéton** (protocole MFA, Section 3.2). Il s'agit, dans le futur de faire confluer ces deux différentes approches de recherche présentées dans le Chapitre 3. Mon hypothèse est l'existence d'une ville duale (pour simplifier, la ville des tissus traditionnels et celle des tissus modernes et périurbains, même s'il y a interpénétration des régions morphologiques et tous les tissus sont inégalement présents dans les deux sous-espaces urbains) au sein de laquelle différentes propriétés configurationnelles peuvent être discriminantes pour comprendre les localisations commerciales. **Cette recherche est actuellement en cours** grâce à la thèse d'A. Araldi, que je co-dirige dans le cadre d'une convention CIFRE avec la Chambre de Commerce et Industrie de Nice Côte d'Azur (2016-2019).

Si dans le cadre de cette recherche, les analyses tissulaires et configurationnelles sont conduites de manière coordonnée mais indépendante (la même ontologie des unités spatiales est utilisée, mais les analyses sont conduites en parallèle et ensuite croisées), **un défi à relever pour des projets futurs sera celui d'hybrider les métriques configurationnelles (MCA, Space Syntax) et tissulaires (MFA)**. De

nouvelles recherches seront également lancées pour **faire converger les approches tissulaires et configurationnelles avec celle des paysages urbains perçus** : la notion de caractéristique morphologique visible, sommairement intégrée dans la méthode tissulaire MFA, est en effet au centre des recherches sur la visibilité de l'espace urbain dans sa tridimensionnalité et dans sa phénoménologie. Le premier aspect est aujourd'hui intégré dans la **modélisation tridimensionnelle de la ville** (maquettes virtuelles, urbanisme procédural tridimensionnel, etc.) permettant de nouveaux développements morpho-métriques. Le second ouvre sur **le plus vaste horizon des ambiances urbaines**, pour lequel nous disposons en France d'équipes de recherches pionnières. Des collaborations peuvent ainsi être envisagées avec les UMR AAU (équipes CRENEAU à Nantes et CRESSON à Grenoble) et MAP (Marseille, Lyon, Nancy).

2. **Opérationnaliser et tester les théories morpho-dynamiques**, notamment la théorie de la toile urbaine et celle du champ d'information urbaine de Salingaros et les comparer aux hypothèses morpho-dynamiques des approches configurationnelles.

Les recherches conduites ici seront à la fois théoriques et méthodologiques. En effet, les approches configurationnelles disposent d'une grande richesse d'outils de géocomputation (par exemple, les logiciels UNA, Spatial DNA, DepthMap, etc.). Les calculs effectués par ces outils sont essentiellement basés sur la modélisation d'un graphe (primal/dual) et de son évaluation par l'ensemble des chemins minimaux de tout point à tout point par rapport aux différentes métriques configurationnelles, selon la théorie du mouvement naturel (Hillier et al. 1993, Hillier 1996). Dans cette approche, la localisation des fonctions urbaines est une fonction des propriétés configurationnelles.

En revanche, les théories morpho-dynamiques de Salingaros comme celle de la toile urbaine nécessitent des outils plus souples, intégrant différentes hypothèses d'interaction entre les éléments de forme et les usagers de la ville (dépassement de la théorie du mouvement naturel). Je reconnais alors l'intérêt du **recours à des plateformes de modélisation à base d'agents pour le calcul des propriétés morpho-dynamiques des formes urbaines**. Il s'agirait ici, d'une perspective originale de l'utilisation de la modélisation à base d'agents, son objectif n'étant ni la simulation réaliste des comportements d'agents dans l'espace urbain (comme dans Antoni et al. 2016), ni celui de l'évolution urbaine, mais de manière plus spécifique celui de la mesure d'un potentiel morpho-dynamique selon les théories de Salingaros. Cette perspective s'insère dans la direction de recherche ouverte par Badariotti et al. (2007, 2009) avec le modèle Remus, où le formalisme des automates cellulaires et l'approche réticulaire étaient précisément utilisés pour explorer les caractéristiques morpho-dynamiques de l'espace urbain. J'identifie actuellement GAMA (Taillandier et al. 2012, Drogoul et al. 2013) comme étant la plateforme de modélisation la plus à même de supporter ces recherches, de par son format nativement vectoriel apte à modéliser le système morphologique dans toutes ses composantes (rues, bâtiments, parcelles). Il sera ainsi aisé de tester les implications des théories configurationnelles plus classiques et de celles proposées par Salingaros sur des petits espaces d'étude paradigmatiques de formes urbaines différentes. Des ouvertures vers des modélisations dynamiques des morphologies urbaines peuvent également être envisagées, en profitant des acquis des collègues d'ESPACE sur le modèle Raumulus (Moreno et al. 2012). Toutes les recherches ici identifiées bénéficieront à être portée par l'ensemble de l'action « Complexité Urbaine et Réseaux » de l'UMR ESPACE.

À l'extérieur du laboratoire, un projet est actuellement en gestation en **partenariat avec le Sensible City Lab auprès du MIT** (dans le cadre du réseau piloté par UCA/IMREDD dans le domaine des Smart Cities). La cible est ici **la théorie du champ d'information urbain de Salingaros**, selon laquelle l'espace public de la ville et les formes urbaines qui y sont visibles doivent être conçues en tant que sources

d'information pour les usagers de la ville. Il s'agit, pour l'instant de tester cette théorie : le contenu informationnel de photographies prises depuis la rue sera analysé par des algorithmes appropriés et sera corrélé avec les pratiques spatiales des piétons dans des petits espaces. Dans une seconde phase, le traitement automatique des grandes bases d'images (telles que les photographies du Street-View de Google Earth) éventuellement couplé à l'analyse de données issues des réseaux sociaux (SMGI, voir ci-dessous) et aux ontologies du web sémantique permettrait de concevoir une architecture de recherche qui s'insère déjà dans le point 3 ci-dessous (recherches empiriques de grand ampleur). Le projet Treepedia, récemment lancé au MIT (www.citylab.com/design/2017/01/mit-senseable-city-lab-treepedia-mapping-urban-trees/512132/), montre tout le potentiel du traitement automatique des bases d'images urbaines, même s'il se limite à la quantification de la verdure dans l'espace de visibilité du piéton. Dans notre projet, en revanche, les théories morpho-dynamiques convergeraient avec des enjeux de psychologie environnementale et d'ingénierie de la connaissance. L'objectif est d'analyser et cartographier le potentiel d'urbanité de tout le réseau d'espaces publics dans la ville. Les retombées de cette recherche pour les praticiens de la ville sont nombreuses : du bien-être en ville à la conception urbanistique et architecturale, du développement de services numériques innovants pour les usagers de la ville aux stratégies de publicité dans les espaces publics. Le consortium du projet est actuellement à la recherche de financements appropriés.

3. Conduire des recherches empiriques de grande ampleur susceptibles d'arbitrer entre différentes hypothèses morpho-dynamiques.

À la convergence des deux points précédents, ces recherches souhaitent innover dans la mobilisation de théories morpho-dynamiques tout en travaillant sur des grandes bases de données empiriques. L'objectif est de lier la morphométrie urbaine, guidée par les théories de la complexité structurelle de la ville, à la description des dynamiques observables dans des cas d'étude. Mon équipe pourra compter sur l'expérience de recherches déjà conduites dans cette direction (Fusco et al. 2015, Venerandi et al. 2017). Le passage aux données empiriques nécessitera un raccord avec les formalismes de la connaissance incertaine. Disposant de données abondantes pour décrire des fonctionnements et des formes observables, on se retrouvera dans des contextes d'incertitude moyenne, nous donnant la possibilité de recourir à des approches bayésiennes, possibilistes, en théorie des évidences, etc. Des grandes opportunités sont également ouvertes par la disponibilité de nouvelles bases de données massives issues des réseaux sociaux (SMGI – *Social Media Geographic Information*, Campagna 2014, Campagna et al. 2015) avec la perspective prometteuse de pouvoir mettre en relation des formes urbaines avec leur perceptions sociales (les caractéristiques intériorisées des lieux).

Un projet de recherche que je viens de lancer dans cette direction est « **Incertimmo - Prise en compte de l'Incertain pour une Modélisation Spatiale des Valeurs Immobilières dans la Ville** », projet que je co-dirigerai et qui a obtenu un financement par l'IDEX UCA-JEDI (2018-19). Seront ici explorées les relations multiples entre la forme urbaine, appréhendée dans toute sa complexité et sa multiplicité de registres, et la spatialité des dynamiques de valorisation et dévalorisation immobilière du parc résidentiel. Dans une étroite collaboration avec les informaticiens du laboratoire I3S, le projet vise également à **différencier et à évaluer séparément les incertitudes ontiques et épistémiques des valorisations immobilières** du parc de chaque segment de rue au sein d'une aire métropolitaine. On peut aisément saisir les enjeux d'une différenciation des incertitudes : l'incertitude ontique de la valorisation des logements d'une rue est à mettre en relation avec la variabilité intrinsèque de l'offre de logements dans cette rue et mesure par là un potentiel de mixité sociale ; l'incertitude épistémique est en revanche une fonction de notre ignorance de cette offre résidentielle ou de sa perception par les acteurs urbains, et doit être utilisée pour qualifier les connaissances produites par nos analyses. Le

partenariat des chercheurs du projet avec une start-up, Kinaxia, souhaitant intégrer ces connaissances dans des services aux acteurs urbains pose un défi ultérieur pour parvenir à identifier une bonne pratique d'usage des connaissances morpho-dynamiques incertaines.

Ces trois familles de recherches ont également vocation à s'inscrire dans des partenariats à l'extérieur du laboratoire ESPACE. Je compte ainsi poursuivre les collaborations interdisciplinaires avec les sciences informatiques (laboratoires I3S à Sophia Antipolis, IRIT à Toulouse et LIA à Avignon) et poursuivre mon investissement dans les actions prospectives sur l'incertitude épistémique au sein du GDR MAGIS.

Je travaille également à la construction d'un **partenariat de long terme entre le laboratoire ESPACE et le Département de Génie Urbain et le Center for Spatial Information Science (CSIS) de l'Université de Tokyo**, notamment en matière de recherche morpho-dynamique. Avec les collègues japonais, je participe ainsi au projet « *Spatial Structures and Dynamics of Global Coastal Cities. Analysis and Evaluation Approaches to Support Sustainable Metropolitan Development* » (2017-2018), porté par J. Perez, qui vise à analyser les relations entre organisation spatiale et développement socioéconomique de trois grandes métropoles littorales (Osaka, Rio de Janeiro et la métropole provençale).

En matière de SMGI et VGI (*Volunteered Geographic Information*) urbaine, les partenariats privilégiés de ces actions sont celui avec le DICAAR (Université de Cagliari, Italie) et le réseau de l'action prospective VGI et *Crowdsourcing* du GDR MAGIS. Les analyses morpho-dynamiques bénéficieront en revanche des collaborations déjà en place avec le DESTEC de l'Université de Pise (Italie), l'Institut de Géodésie de l'Université Technique de Darmstadt (Allemagne) et de celles à envisager avec les laboratoires de recherche en architecture-urbanisme (notamment les UMR AAU et MAP).

Au final, l'objectif commun de toutes ces recherches est d'affiner l'*épistémè* de la morpho-dynamique urbaine, pour identifier les morphologies à plus haut potentiel de catalyse des fonctions urbaines et d'adaptation aux différentes dynamiques de la ville. Il s'agit de comprendre quelles sont les caractéristiques de la ville résiliente et antifrangible, toujours dans un contexte de connaissance incertaine.

La recherche morpho-prospective

Une seconde grande direction de recherche est celle de la **morpho-prospective urbaine**. Elle vise à faire converger la géoprospective territoriale de la ville avec les recherches méthodologiques sur l'incertitude dans la connaissance géographique. Dans le cadre du prochain quinquennal du laboratoire ESPACE, elle s'inscrit d'abord dans l'action « Dynamique de changement et espace », portée par Ch. Voiron-Canicio et D. Serre. Pour certains développements méthodologiques, notamment dans le domaine de l'intelligence artificielle, elle s'insère également dans l'action « Données massives, modélisation et intelligence artificielle (DAMIA) », portée par D. Moreno et D. Josselin.

Le principal objectif de « Dynamique de changement et espace » est d'appréhender les potentiels, les marges de manœuvre et les évolutions possibles (et plausibles) des territoires et des dynamiques de changement spatial. Une attention particulière est donnée à la formalisation conceptuelle et théorique du changement spatial et aux modélisations prospectives ouvrant vers l'opérationnalité. Un des enjeux de la modélisation prospective des territoires, assumé dans cette action, peut être résumé en deux formules synthétiques : savoir où aller (formulation d'objectifs partagés de développement durable des territoires), et savoir comment y aller (dialectique entre intervention sur le système spatial et son auto-organisation émergente), en identifiant les leviers d'action, les conditions de possibilité

« d'une révolution réaliste » pour inscrire la durabilité dans le fonctionnement de l'espace (Folke et al. 2012, Genre-Grandpierre 2014).

Ma contribution plus personnelle portera sur la géoprospective urbaine, intégrant la spatialité des relations morpho-dynamiques et l'incertitude des connaissances géographiques dans l'évaluation des potentiels de changements existants et dans la création des scénarios futurs. Comme les analyses de tout cet essai le montrent, l'organisation spatiale et les fonctionnements des villes ont été profondément modifiés au cours des dernières décennies sous l'impulsion de la métropolisation, avec l'arrivée de nouveaux objets spatiaux (grands équipements, quartiers des affaires, friches industrielles, espaces résidentiels ségrégués), de nouvelles formes tissulaires, de nouvelles configurations, et la modification des pratiques spatiales (pratique poly-topique des espaces, gentrification des centres, touristification de certains sous-espaces, cosmopolitisation d'autres, etc.). Or ces espaces métropolitains concentrent d'énormes enjeux de développement durable. Dès que la question de la durabilité urbaine est soulevée on pense tout-de-suite à la consommation de ressources (énergie, sol) et à la contribution aux pollutions (locales et globales). **Le grand enjeu de durabilité que je souhaite cibler est en revanche celui de la capacité d'une forme urbaine à s'adapter et à se transformer, à être hautement résiliente face aux changements sociotechniques auxquels elle sera forcément confrontée dans un futur proche.** Il s'agit à la fois de rendre le développement urbain antifragile (Taleb 2012), tirant le meilleur profit de l'innovation sociotechnique et, surtout, d'éviter l'obsolescence précoce de pans entiers de l'espace urbain, avec le gaspillage de ressources essentielles, capitalisées dans ses formes physiques.

Développer et opérationnaliser une approche morphologique à la résilience urbaine face au changement sociotechnique, et pas seulement face à une perturbation externe (catastrophe naturelle, attaque terroriste, etc.) constitue un véritable défi scientifique. Les avancées des recherches sur la morpho-dynamique urbaine y contribueront, mais d'autres dimensions essentielles devront être intégrées. **La résilience configurationnelle** (Hillier 1996, Cutini 2013, Abshirini et Koch 2017) **et la résilience morphologique** de Mehaffy et Salingeros (2013) **seront confrontées aux enjeux de la connaissance incertaine.**

Comme montré dans les sections précédentes, lorsque la réflexion se porte sur des scénarios plausibles d'évolution morpho-dynamique, la connaissance (toujours imparfaite) des trajectoires passées et des fonctionnements présents se couple à des incertitudes épistémiques profondes sur la possibilité de bifurcations possibles dans le futur. Il faudra ainsi **approfondir le dialogue avec l'IA** (et plus précisément l'ingénierie des connaissances) **autour de l'incertitude profonde** (Walker et al. 2013) **et des manières de la formaliser.** Ces recherches solliciteront alors l'apport des partenariats interdisciplinaires dans le cadre de l'MSHS Sud-Est (je co-porterai le projet « Prise en compte de l'incertitude dans la fabrication du savoir scientifique » au sein du programme 2018-2022) et celui des laboratoires d'informatique avec lesquels j'ai déjà collaboré autour des formalismes de la connaissance incertaine (UMR IRIT à Toulouse et UMR I3S à Sophia Antipolis). Nous ne disposerons pas d'informations statistiques abondantes. L'attention est sur les devenir possibles des espaces urbains, sur la prospection des permanences, des adaptations et des transformations, l'approche par la *via negativa* pourra y jouer un rôle (comme esquissé dans la Section 5.2), couplée avec les résultats des recherches plus analytiques sur la résilience morpho-dynamique.

Ces recherches s'ouvriront également sur l'aide à la décision en aménagement/urbanisme, en lien avec l'action « Transfert de connaissances territoriales complexes : de la production à l'utilisation (TACTIC) » de l'Axe C du futur quinquennal du laboratoire ESPACE et avec la participation au GDR Policy Analytics, piloté par l'UMR LAMSADE (Paris-Dauphine). L'ensemble de ces partenariats permettra

d'ouvrir mes recherches, et celles des collègues travaillant dans l'action « Dynamiques de changement et espace » vers un aménagement anti-fragile des systèmes urbains et métropolitains (Blecic et Cecchini 2016), dans leur complexité et en contexte d'incertitude. En capitalisant sur les acquis du laboratoire ESPACE, et en tirant profit de la richesse des dynamiques qui les caractérisent, les espaces urbains et métropolitains de la méditerranée française constitueront un laboratoire privilégié pour les recherches conduites en matière de modélisation géoprospective.

Au sein de l'action TACTIC, un **raccord sera recherché avec les acteurs-territoriaux, pour participer à la co-construction d'une véritable démarche de géoprospective urbaine**. La perspective devient ici celle d'une recherche-action, l'*épistémè* incertaine de la ville complexe, résiliente et antifrangible devra s'ouvrir à la *techné* de l'urbanisme professionnel et à la *phronesis* de la concertation et de la décision politique. Il s'agit d'un défi pas seulement scientifique, mais plus globalement sociétal. La participation active de l'équipe niçoise de l'UMR ESPACE aux activités de l'Institut Méditerranéen du Risque, de l'Environnement et du Développement Durable (IMREDD) de l'Université de la Côte d'Azur permettra de mobiliser le partenariat privilégié avec la Métropole Nice Côte d'Azur et avec les autres parties prenantes (entreprises, collectivités territoriales) mobilisées autour de l'IMREDD sur les thématiques de l'innovation urbaine. Ce partenariat local sera exploité également pour bâtir un réseau de recherche plus vaste à l'international (les collaborations actuellement envisagées avec le MIT rentrent dans le réseau IMREDD sur la *smart city*).

La recherche morpho-culturelle

À un niveau encore plus général, l'entrée de la forme urbaine peut aujourd'hui **faire converger** deux grandes traditions dans la recherche urbaine. D'un côté, celle de **l'analyse spatiale** et de la géocomputation ; de l'autre, celle de **l'analyse culturelle** des formes. La forme urbaine n'est pas seulement émergence d'éléments en interaction et complexité structurelle à un moment donné, elle est également porteuse de sens pour ses usagers, sens culturellement, socialement et historiquement connoté participant à la complexité de la ville en tant que système social (Slater 1990, Vance 1990, Roncayolo 1996, Habraken 1998). On a même vu que la culture, comme le projet, est une manière de coordonner les actions des acteurs urbains. **La culture peut ainsi devenir une nouvelle perspective pour la complexité structurelle de la ville.**

La forme urbaine est toujours liée à une culture urbaine. Lévy (2005) souligne comment les registres des tissus urbains et des tracés y sont liés dans la manière même de concevoir l'espace urbain, celui du paysage perçu étant davantage lié à la culture visuelle d'une société et à la symbolique des objets urbains. L'analyse typo-morphologique était née avec Muratori (1959) précisément dans un contexte de redécouverte de la perspective culturaliste en urbanisme.

Les travaux de N.J. Habraken (1998), architecte et urbaniste hollandais, directeur du département d'architecture du MIT, se nourrissent également des apports de l'analyse typo-morphologique. Habraken approfondit l'étude des formes en mettant en évidence toute la complexité inhérente à la combinaison de trois logiques différentes qui les motivent : les logiques de l'ordre physique (contraintes de la gravité, de l'organisation des enceintes, de l'écoulement des flux), celles de l'ordre territorial (le contrôle des accès et l'emboîtement des notions d'espace public et d'espace privé) et celles de l'ordre des valeurs sociales et culturelles partagées. Dans les trois cas de figure, les formes urbaines sont redevables d'imbrications multi-scalaires, qui permettent à l'auteur de dériver des diagrammes hiérarchisés d'assemblage pour la génération des configurations spatiales basées sur les contraintes physiques, ainsi que des diagrammes d'assemblage de domaines territoriaux imbriqués répondant aux contraintes du contrôle des entrées et des sorties d'un espace territorialisé. Or,

Habraken approfondit également la relativité culturelle des organisations urbaines et la valeur culturelle des types. Les villes européennes et celles du Moyen-Orient, par exemple, accordent un rôle différent aux formes physiques et aux formes territoriales dans la régulation de leurs fonctionnements. Au-delà de répondre à des besoins déterminés à une époque historique donnée, les types (architecturaux ou tissulaires) sont surtout un filtre cognitif, une représentation sociale de valeurs et de besoins symboliques matérialisés par des configurations spatiales données. Si le rôle des valeurs sociales sous-tendant les types était déjà présent dans les travaux des pères fondateurs de la typomorphologie (pour Muratori, Caniggia et Maffei les types cristallisent de la conscience spontanée des constructeurs des différentes époques historiques), Habraken permet d'identifier la permanence (voir le renforcement) de ces logiques dans la conception des formes bâties actuelles.

Avec Hillier et Hanson (1984), ainsi que Habraken (1998) et Vance (1990), je peux alors esquisser quelques aspects majeurs de l'évolution des relations morpho-culturelles de la ville occidentale :

- Ce qui était propre à la forme urbaine de la ville occidentale depuis le moyen âge n'est pas seulement la densité ou la mixité sociale et fonctionnelle, mais surtout l'accès direct des bâtiments depuis un réseau continu et particulièrement maillé de rue publiques.
- La rationalisation de la forme urbaine a été théorisée et implémenté au cours du XIX^e siècle (régularisation et planification du maillage viaire) sous l'impulsion d'une nouvelle culture scientifique et technique (Cerdà 1867), l'organisation topologique et configurationnelle de la ville traditionnelle n'a néanmoins pas été bouleversée par cette nouvelle géométrie.
- Un changement de paradigme morphologique a eu lieu dans le second après-guerre : la nouvelle logique de l'enceinte (*compound/estate*) et le développement de configurations arborescentes donnent un pouvoir de contrôle accru sur l'accès aux fragments urbains (périurbain pavillonnaire ou cité moderne), avec mise à l'écart des flux de passage et renoncement à l'organisation configurationnelle de la ville traditionnelle. Dans les termes de la syntaxe spatiale on sacrifie l'intégration pour le contrôle, dans un changement de culture urbaine qui est corrélatif aux processus d'individualisation et de privatisation dans les domaines sociétal et socioéconomique.

Enrichir l'analyse de la complexité structurelle de la ville par la prise en compte de la dimension culturelle fait surgir une nouvelle tension épistémique. Elle découle du paradoxe de la **mise en abîmes entre les deux pôles antinomiques de la nature et de la culture** dans l'appréhension de la forme urbaine.

Les auteurs qui ont analysé la forme urbaine comme signature d'un système complexe auto-organisé (Alexander 1987, 2002-2005, Salingaros 2005) remarquent ainsi que les formes urbaines traditionnelles, produites pendant plus de cinq millénaires d'histoire urbaine (Mumford 1961, Benevolo 1993), étaient « organiques », c'est-à-dire respectaient les propriétés clés des systèmes complexes auto-organisés que l'on retrouve dans la nature (notamment dans les écosystèmes et dans les organismes biologiques). En revanche, l'urbanisme moderne du XX^e siècle a suivi des schémas culturels rationalistes dans des démarches de production descendantes (*top-down*) qui ont appauvri la complexité morphologique de la ville, en l'éloignant des principes d'auto-organisation naturelle de systèmes complexes. On serait donc face à une divergence entre nature et culture : nature des systèmes complexes auto-organisés et culture de l'urbanisme moderne. Il va de soi, qu'un retour aux principes de l'auto-organisation naturelle est souhaité et identifié comme principe d'un urbanisme renouvelé.

Or, **les approches plus attentives à l'histoire urbaine et aux lectures culturelles de la ville** (Muratori 1959, Mumford 1961, Caniggia et Maffei 1979, Benevolo 1993, Roncayolo 1996, Vance 1990,

Habraken 1998) **montrent que la ville traditionnelle aussi était produite par des schémas culturels, mélangeant actions individuelles et approches descendantes d'un urbanisme prémoderne.** Caniggia et Maffei identifient une mutation culturelle avec la naissance de l'urbanisme moderne : de la conscience spontanée des typo-morphologies traditionnelles à une conscience critique et rationalisante où l'architecte-urbaniste propose des formes de nouvelle conception, même pour le bâti ordinaire qui fait l'essentiel des tissus urbains. Ces formes nouvelles concernent également les réseaux viaires dès lors que les ingénieurs doivent concevoir des solutions techniques pour les nouvelles technologies des transports ferrés et de l'automobile.

Effectivement, à toute époque historique, les décisions à la base de la production des morphologies urbaines, qu'elles soient le fait d'acteurs individuels (d'abord les ménages et ensuite les promoteurs, à partir du moment où cette figure professionnelle fait son apparition dans l'organisation socioéconomique de la ville) ou de la puissance publique (par le biais de plans et de règles qui s'imposent aux acteurs individuels) relèvent de schémas culturels. Ces schémas culturels doivent être définis d'une façon relativement ample, c'est-à-dire en intégrant dans la culture d'une société urbaine tant la technologie que les normes sociales et esthétiques. La question serait donc pourquoi passe-t-on de schémas culturels intégrant (sans le savoir) les recettes clés de la complexité auto-organisée à des schémas culturels qui lui font obstacle ?

Une possible réponse est celle du temps, qui a opéré une adaptation des schémas culturels traditionnels vers des solutions plus complexes, mais temps qui manquerait crucialement aux schémas culturels du XX^e siècle, dont les dysfonctionnements ont commencé à apparaître au cours des dernières décennies seulement. La question de l'épreuve du temps renvoie aussi aux théories de la complexité, notamment à l'effet Lindy de Mandelbrot (1982). D'autre part, les mutations de l'urbain suite à la révolution industrielle (forte accélération de l'urbanisation, nécessité d'organiser des agglomérations millionnaires) et à la métropolisation contemporaine, ont été à la base de la recherche de nouveaux schémas culturels de production de morphologies urbaines. L'analyse et la modélisation spatiale, guidée par la science de la complexité, mettent aujourd'hui en évidence les faiblesses de ces schémas culturels. De surcroît, les nouvelles perspectives morphologiques identifiées doivent intégrer le caractère incertain des connaissances produites (l'évaluation est beaucoup plus qualitative que ce que l'on est prêt à admettre, et on ne saurait pas imposer des nouvelles morphologies avec la même assurance qui avait caractérisé le mouvement moderne dans l'imposition de ses solutions). Et si l'on souhaite un renouveau de modèles culturels, la nouvelle science de la ville doit descendre sur le terrain concret des batailles culturelles, dans une perspective de recherche-action à laquelle ses contributeurs ne sont pas forcément prêts.

Cette réflexion sur la dimension culturelle des formes urbaines me permet d'identifier une troisième direction de recherche future. **Dans mes recherches, la perspective morpho-culturelle ne se conçoit pas de façon isolée, elle vient enrichir et féconder les recherches morpho-dynamiques et morpho-prospectives.**

L'analyse de la complexité structurelle de la ville selon le paradigme géocomputationnel (analyse spatiale) me permet par exemple de **rentrer dans l'étude du contenu culturel des formes urbaines avec un certain nombre d'hypothèses de travail.** Ainsi, la dichotomie entre réseaux d'avant-plan et d'arrière-plan d'Hillier (2002, 2012), n'est pas seulement une façon d'aborder l'opposition entre l'espace de l'activité et celui de l'habiter. De manière plus générale Hillier oppose les usages génératifs et conservatifs de l'espace par rapport aux dynamiques sociales. Ainsi la morphologie du réseau d'avant-plan à fort potentiel de mouvement laisse beaucoup plus d'opportunités à l'aléa dans les *patterns* de rencontre qu'il rend possible. Il est à usage génératif dans la mesure où il a comme objectif de catalyser la coprésence et la génération de nouveautés (sérendipité, créativité). Ce qui est

intéressant, selon les observations d’Hillier, est que sa configuration et son rôle est à peu près universel dans des villes appartenant à des contextes culturels fort différents. En revanche, le réseau interstitiel d’arrière-plan permet un usage conservatif de l’espace car son objectif est le maintien et le renforcement des structures sociales déjà en place (rôle de reproduction sociale). En général, sa morphologie facilite davantage de contrôle, mais en réalité sa configuration est beaucoup plus spécifique au contexte de la culture urbaine qu’il se propose de maintenir (les règles imposées aux *patterns* de mouvement et de rencontre possibles dépendent davantage des systèmes culturels en place).

C’est l’ensemble des approches géocomputationnelles à la forme urbaine qui sont confrontées aux relations morpho-culturelles. Ainsi l’application de notre méthode MFA à l’espace métropolitain azuréen a montré que les formes des tissus urbains observables aujourd’hui renvoient souvent à des époques historiques différentes, caractérisés par des contextes de productions et des cultures urbaines différentes. L’approche MFA à l’analyse des tissus urbains est actuellement en train de nourrir un projet de recherche sur le lien avec la satisfaction résidentielle dans les villes méditerranéennes françaises et turques dans le cadre d’un **partenariat scientifique engagé avec le Département d’Aménagement Urbain et Régional de l’Université Dokuz Eylul d’Izmir (Turquie)** ayant débouché sur la codirection de la thèse de doctorat I. Erin (2016-2019). Dans une approche comparative, ici essentielle, un des objectifs de la recherche est effectivement d’identifier si des formes tissulaires semblables sont associées aux mêmes représentations sociales, et finalement à des niveaux de satisfaction comparables, dans les deux différentes cultures urbaines de la Méditerranée française et turque. Cette recherche se caractérise également par l’interdisciplinarité entre géographie urbaine, urbanisme et psychologie environnementale.

Au sein du programme 2018-2022 l’MSHS Sud-Est (Nice) je viens également de lancer le projet « **Modèles urbains en Europe Latine Méditerranéenne et ailleurs** » avec les historiens des laboratoires CMMC et CEPAM. Ce projet aborde l’objet ville comme un des supports essentiels d’un espace civilisationnel. Dans une approche comparative, la ville latine méditerranéenne est étudiée dans ses relations à d’autres modèles de ville, qui lui sont proches mais avec lesquels elle ne se confond pas : la ville des rives Sud et Est de la Méditerranée, d’Europe, d’Amérique Latine et d’autres espaces où la culture urbaine latine s’est projetée au cours de l’histoire. L’entrée par la morphologie urbaine est privilégiée. La forme d’une ville est à la fois le résultat de la sédimentation d’une histoire urbaine, un élément de compréhension de ses fonctionnements présents et le point de départ pour ses projets futurs. Mais les morphologies sont filtrées par les perceptions sociales, par les cultures et par les projets sociétaux. A l’heure où de nouvelles utopies urbaines voient le jour et où la mondialisation semble uniformiser jusqu’aux modèles de production de l’espace urbain, **une réflexion sur ce qui est propre au modèle de ville latine méditerranéenne et à ses rapports avec ses villes « cousines » devient essentielle pour comprendre les enjeux que la mondialisation pose au sens des lieux urbains, à leur patrimonialisation et à leur transformation.**

Dans ces recherches, une plus grande attention sera clairement portée aux éléments qualitatifs de la forme urbaine, mais mon objectif sera une mise en relation avec les approches morpho-métriques et morpho-dynamiques dès que possible. Ici aussi des nouvelles perspectives computationnelles sont ouvertes par la disponibilité de données de réseaux sociaux (SMGI), susceptibles de refonder l’étude de la représentation sociale des espaces urbains contemporains. Mais il s’agit également d’un engagement intellectuel nécessitant de l’interdisciplinarité vers les disciplines qui étudient les schémas culturels des formes urbaines, notamment la géographie culturelle, la psychologie environnementale, l’anthropologie urbaine et l’histoire urbaine. Cette convergence demeure une **perspective**

particulièrement prometteuse pour l'agenda de recherche à venir, susceptible **de « recoudre » certaines fractures qui ont caractérisé les études urbaines au cours des dernières décennies.**

Une ambition scientifique particulière que je porte dans ce domaine est également celle de **reconstituer et de m'engager dans l'animation d'ISUF France.** ISUF (*International Seminar on Urban Form*) est le réseau international au sein duquel convergent les recherches sur la morphologie urbaine. ISUF France y a joué un rôle important lors de sa fondation dans les années 1990 (Vernez-Moudon 1997), mais a successivement disparu. Aujourd'hui le réseau international est fortement caractérisé par l'action d'ISUF Italie (une communauté qui reste essentiellement dans une démarche de projet architectural) et ISUF UK (très focalisé sur l'histoire urbaine et les perspectives de la géographie culturelle). Des nouvelles sections régionales émergent (notamment États-Unis, Chine, Turquie et l'espace lusophone) et les approches computationnelles y ont fait une première percée, même si essentiellement limitée à la syntaxe spatiale.

La reconstitution d'ISUF France peut partir des contributions fondatrices que les chercheurs français avaient apporté au sein d'ISUF du fait des travaux des architectes des écoles de Versailles et de Paris (Castex et al. 1980, Borie et al. 1980, Borie et Denieul 1984, Panerai et al. 1997). Je pense cependant que notre intérêt sera également d'innover cette image d'ISUF France et de montrer toute la diversité des recherches sur la forme urbaine qui se conduisent actuellement en France (de la géocomputation de la forme, à l'analyse des formes perçues et des ambiances, en passant par les recherches historiques sur la forme urbaine et celles sur la psychologie environnementale urbaine). Personnellement j'y ajouterais un renouveau des approches computationnelles, l'ouverture à la théorie de la complexité et la géoprospective des formes urbaines : on a souvent critiqué ISUF de regarder essentiellement l'histoire des formes, sans grande ouverture vers leur futur.

Il ne s'agit pas ici d'un projet scientifique, mais d'un projet de politique scientifique, nécessitant de fédérer des communautés disciplinaires différentes (architecture, urbanisme, géographie urbaine théorique et quantitative, géographie culturelle, histoire urbaine) sous l'ambition commune de faire reconnaître de manière plus coordonnée à l'international nos apports croisés à la recherche sur la forme urbaine.

Travaux personnels cités dans le chapitre

Fusco G. (2010) Uncertainty in Interaction Modelling: Prospecting the Evolution of Urban Network in South-Eastern France. In H. Prade, R. Jeansoulin, O. Papini, S. Schockaert (eds.) *Methods for Handling Imperfect Spatial Information*. Springer, Berlin, p. 357-378.

Fusco G. (2012) Démarche géo-prospective et modélisation causale probabiliste. *Cybergeo*, n° 613, <http://cybergeo.revues.org/25423>, 23 p.

Fusco G., Caglioni M. (2014) Prospecting the evolution of a winegrowing region through MAS modelling. In B. Murgante et al. (eds.) *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2014, Part IV, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8582, Springer, p. 199–214.

Fusco G., Cao C., Dubois D., Prade H., Scarella F., Tettamanzi A. (2015) Social polarization in the metropolitan area of Marseille. Modelling uncertain knowledge with probabilistic and possibilistic networks. ECTQG 2015 Proceedings, *Plurimondi*, VIII, 17, 117-126, <http://plurimondi.poliba.it/index.php/Plurimondi/article/view/39/26>

Fusco G., Scarella F. (2008) Les évolutions de l'habitat dans l'espace azuréen. Analyse des logiques spatiales dans un contexte métropolitain méditerranéen. *XLV^e Colloque de l'ASRDLF*, Rimouski 25-27 août 2008, 25 p.

À retenir

- La non connaissabilité de la ville complexe met en crise les approches traditionnelles de l'aménagement et de l'urbanisme. Certains auteurs proposent ainsi de renoncer à produire des plans et de laisser l'auto-organisation urbaine émerger dans un système de règles.
- En réalité, des connaissances sont déjà injectées dans tout système de règles et la dimension du projet partagé est nécessaire pour coordonner les actions des acteurs individuels.
- Le projet partagé peut aujourd'hui être produit dans une démarche de géoprospective urbaine, attentive à la spatialité de la ville et informée des incertitudes de nos connaissances.
- La forme urbaine la plus à même de traverser les siècles est une forme hautement résiliente et antifragile, capable de s'adapter et de se transformer pour tirer profit de l'innovation sociotechnique que la ville produit constamment. Une théorie complète de la forme résiliente et antifragile reste à bâtir, mais ses bases ont été jetées par Hillier et Salingaros.
- Rendre la ville existante résiliente et antifragile implique de renoncer à l'optimisation. L'objectif est un projet pour augmenter la complexité auto-organisée de la ville. Dans cette optique, Alexander propose l'approche du *pattern language*, heuristique de solutions qui ont fait leur preuve dans le temps long.
- La preuve du temps et la *via negativa* permettent de proposer une ébauche de géoprospective urbaine de long terme. Cet exercice permet de souligner des enjeux de connaissance morphologique et de bâtir un agenda de recherche en trois directions.

- La première direction est morpho-dynamique et analytique. Elle relève le défi d'affiner la connaissance scientifique des relations entre formes, fonctions et dynamiques de la ville, pour identifier les caractéristiques de la ville résiliente et antifrangible, en contexte d'incertitude.
- La seconde direction est morpho-prospective et aborde plus directement les dimensions du projet et de l'aide à la décision dans une optique de recherche-action. Elle se nourrit des connaissances morpho-dynamiques mais est confrontée à un contexte d'incertitude profonde qui justifie une collaboration interdisciplinaire avec l'IA.
- La troisième direction est morpho-culturelle : la forme urbaine peut faire converger l'analyse spatiale et l'analyse culturelle de la ville et recoudre des fractures qui ont caractérisé les études urbaines ces dernières décennies. Cette perspective motive également de reconstituer ISUF France, fédérant approches analytiques et culturelles à la forme urbaine.
- Ces trois directions s'insèrent dans le projet scientifique 2018-2022 de l'UMR ESPACE, dont j'assumerai la direction adjointe et le pilotage de plusieurs actions. Elles trouvent leurs conditions de réalisations également dans l'insertion dans des réseaux de recherche nationaux (GDR MAGIS, GDR Policy Analytics) et internationaux (Japon, Italie, Etats-Unis, Allemagne, Turquie), dans la participation active au projet scientifique de l'MSHS Sud-Est et dans les partenariats avec les acteurs territoriaux et économiques au sein de l'IMREDD.

Bibliographie

- Abshirini A., Koch D. (2017) Resilience, space syntax and spatial interfaces: The case of river cities. *ITU A/Z*, vol. 14, n° 1, 25-41.
- Aero T. (2006) Residential Choice from a Lifestyle Perspective. *Housing, Theory and Society*, vol. 23, no. 2, 109-130.
- Ageudad R., Doukari O., Houet Th., Avner P., Viguié V. (2016) Etalement urbain et géoprospective : apports et limites des modèles de spatialisation. *Cybergeo*, n° 782, <http://journals.openedition.org/cybergeo/27668>
- Albert R., Jeong H., Barabasi A. (2000) Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 406, 378-482.
- Albeverio S., Andrey D., Giordano P., Vancheri A. (Eds.) (2008) *The Dynamics of Complex Urban Systems. An Interdisciplinary Approach*. Springer, Berlin.
- Alexander Ch. (1965) A City is Not a Tree. *Architectural Forum*, vol. 122(1), 58-61 et vol. 122(2), 58-62, <http://www.bp.ntu.edu.tw/wp-content/uploads/2011/12/06-Alexander-A-city-is-not-a-tree.pdf>
- Alexander Ch. (2002-2005) *The Nature of Order. An Essay on the Art of Building and the Nature of the Universe*. 4 volumes. The Center for Environmental Structure, Berkeley.
- Alexander Ch., Ishikawa S., Silverstein M. (1977) *A pattern Language. Towns, Buildings, Construction*. Oxford University Press, New York.
- Alexander Ch., Neis H., Anninou A., King I. (1987) *A New Theory of Urban Design*. Oxford University Press, Oxford.
- Alfasi N., Portugali J. (2007) Planning rules for a self-planned city. *Planning Theory*, 6(2), 164-482.
- Allen P. (1997) *Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity*. Gordon Breach Science Publishers, Amsterdam.
- Allen P., Sanglier M. (1979) A Dynamic Model of Growth in a Central Place System. *Geographical Analysis*, 11, 256-272.
- Alonso W. (1964) *Location and Land Use. Toward a General Theory of Land Rent*. Harvard University Press.
- Anderson Ch. (2008) The End of Theory: The Data Deluge Makes the Scientific Method Obsolete. *Wired*, <https://www.wired.com/2008/06/pb-theory/>
- Anderson P. (1972) More is different: Broken symmetry and the hierarchical nature of science. *Science*, 177, 393-396.
- Andersson C., Törnberg A., Törnberg P. (2014) *Societal systems – complex or worse? Futures*, Vol. 63 (2014), 145-157.
- Anselin L. (1995) Local Indicators of spatial association. *Geographical Analysis*, 27(2), 93-115.
- Antoni J.P., Lunardi N., Vuidel G. (2016) Simuler les mobilités individuelles. *Revue Internationale de Géomatique*, 26(2), 237-262.
- Apparicio Ph. (2000) Residential segregation indices: a tool integrated into a geographical information system. *Cybergeo*, n. 134, <http://cybergeo.revues.org/12063>
- Aristote (trad. R. Bodéüs, 2004) *Éthique à Nicomaque*. Flammarion, Paris.
- Armatte M. (1995) Robert Gibrat et la loi de l'effet proportionnel. *Mathématiques et sciences humaines*, 129 (1995), 5-35.
- Asami Y., Kubat A., Kitagawa K., Iida S. (2003) Introducing the third dimension on Space Syntax: application on the historical Istanbul. In J. Hanson (ed) *Space Syntax 4th International Symposium Proceedings*, 2, UCL, London, p. 48.1-18.

- Ascher F. (1995) *Métapolis ou l'avenir des villes*. Odile Jacobs, Paris.
- Atmanspacher H. (2001) *Determinism Is Ontic, Determinability is Epistemic*. <http://philsci-archive.pitt.edu/939/1/determ.pdf>
- Audi R. (2015) *Rational Belief. Structure, Grounds, and Intellectual Virtue*. Oxford University Press, Oxford.
- Augoyard J.-F. (2007) Ambiance(s), L'espace anthropologique, *Les cahiers de la recherche architecturale et urbaine*, n° 20/21, 33-37.
- AURG (2000) Schéma Directeur de la Région Grenobloise. Agence d'Urbanisme de la Région Grenobloise, Grenoble.
- Aymonino C. (1977) *Lo studio dei fenomeni urbani*. Officina Edizioni, Roma.
- Badariotti D. (2005) Des fractales pour l'urbanisme ? Quelques pistes de réflexion à partir de l'exemple de Strasbourg-Kehl. *Cahiers de Géographie du Québec*, vol 49, n° 137, 133-156
- Badariotti D. (2006) Les processus morphodynamiques des villes, énigmes et traces. *13èmes journées de Rochebrune, Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels*, ENST, Paris. p. 325-336, <halshs-00164892>
- Badariotti D., Banos A., Moreno D. (2007) Conception d'un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine : le modèle Remus. *Cybergeog*, document 403, <http://cybergeog.revues.org/10993>
- Badariotti D., Banos A., Moreno D. (2009) Morphologie urbaine et réseau - Étude des discontinuités et des ruptures induites par le réseau de circulation à l'aide du modèle Remus. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 19, No.1, 45-66.
- Bagley M., Mokhtarian P. (2002) The impact of residential neighborhood type on travel behavior: a structural equations modeling approach. *The Annals of Regional Science*, 36, 279-297.
- Bairoch P. (1985) *De Jéricho à Mexico : Villes et économies dans l'histoire*. Gallimard, Paris.
- Bak P. (1996) *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. Copernicus, New York.
- Ban H., Ahlqvist O. (2009) Representing and negotiating uncertain geospatial concepts - Where are the exurban areas? *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(4), 233-246.
- Banos A. (2013) *Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en géographie et en SHS*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, <https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-01112668>
- Banos A., Sanders L. (2013) Modéliser et simuler les systèmes spatiaux en géographie. In F. Varenne, M. Silberstein (eds.), *Modéliser et Simuler - Epistémologies et pratiques des modèles et des simulations*, Ebook des éditions Matériologiques, tome 1, chapitre 31, 833-863.
- Bara B.G. (1990) *Scienza cognitiva. Un approccio evolutivo alla simulazione della mente*. Bollati Boringhieri, Torino.
- Barabasi A.L. (2002) *Linked: The New Science of Networks*. Basic Books, New York.
- Barabasi A.L., Albert R. (1999) Emergence of scaling in random networks. *Science* 286 (5439), 509-512.
- Barattucci C. (2006) *Urbanisations dispersées. Interprétations-Actions. France et Italie 1950-2000*. Presses Universitaires de Rennes, Rennes.
- Barton A., Ethier J.-F., Duvauferrier R., Burgun A. (2017) An ontological analysis of medical Bayesian indicators of performance. *Journal of Biomedical Semantics*, 8(1), <https://doi.org/10.1186/s13326-016-0099-4>
- Bassand M. (1997) *Métropolisation et inégalités sociales*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.

- Bassand M. (ed.) (2001) *Vivre et créer l'espace public*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- Batty M. (2005) *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Batty M. (2013) *The New Science of Cities*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Batty M. (2016) Urban Resilience: How Cities Need to Adapt to Unanticipated and Sudden Change. In E. Paté-Cornell et W. Rouse (Eds.) *Perspectives on Complex Global Challenges. Education, Energy, Healthcare, Security and Resilience*. Wiley, Hoboken, NJ, p. 169-171.
- Batty M., Longley P. (1994) *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*, Academic Press.
- Batty M., Vargas C., Smith D., Serras J., Reades J., Johansson A. (2013) SIMULACRA: fast land-use-transportation models for the rapid assessment of urban futures. *Environment and Planning B*, 40, 987-1002.
- Batty M., Xie Y. (1996) Preliminary Evidence for a Theory of the Fractal City. *Environment and Planning A*, vol. 28, n. 10, 1745–1762.
- Bauer S. (2016) Indikatorengestützte Analyse der Einflussnahme von Investoren auf planende Gemeinden im Ansiedlungsprozess von Vorhaben des grossflächigen Einzelhandels. Ein deutsch-französischer Vergleich. PhD Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- Bavelas A. (1948) A mathematical model for small group structures. *Human Organization*, 7, 16–30.
- Beauregard R. (2006) *When America Became Suburban*. University of Minnesota Press.
- Becker A., Naïm P. (1999) *Les réseaux bayésiens – Modèles graphiques de connaissance*. Eyrolles, Paris.
- Bejan A. (2002) Constructal theory of organization in nature: dendritic flows, allometric laws and flight. *Design and Nature*, 2002, 57-66.
- Bejan A., Lorente S. (2005) *La loi constructale*. L'Harmattan, Paris.
- Béjine A. (1974) Différenciation, complexification, évolution des sociétés. *Communications*, 22, 109-118.
- Benenson I., Torrens P. (2004) *Geosimulation: Automata- Based Modeling of Urban Phenomena*, John Wiley, Chichester.
- Benevolo L. (1993) *Storia della città*. 4 volumes. Laterza, Bari / Roma.
- Benevolo L. (2001) *Introduzione all'architettura*. Laterza, Bari / Roma.
- Benevolo L., Boninsegna P. (1986) *Urbino*. Le città nella storia d'Italia, Laterza, Bari / Roma.
- Berger P., Luckmann T. (1966) *The Social Construction of Reality. A Treatise in the Sociology of Knowledge*. Anchor Books, New York.
- Berghauer Pont M., Haupt P. (2010) *SPACEMATRIX, Space, Density and Urban Form*. NAI Publishers, Rotterdam.
- Berkes, F., Folke C. (eds.) (1998) *Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Bernabé A. et al. (2013) Classification automatique des tissus urbains par la méthode des nuées dynamiques. 31^e Rencontres AUGC, Cachan, France, <http://augc2013.ens-cachan.fr/Data/Articles/Contribution1150.pdf>
- Berroir S., Desjardins X., Fleury A., Quéva C. (eds.) (2015) *Lieux et hauts lieux des densités intermédiaires*. Rapport de recherche pour le PUCA, programme « Du Périurbain à l'urbain ». UMR Géographie-cités, Paris.
- Berroir S., Mathian H., Saint-Julien T., Sanders L. (2007) Les pôles de l'activité métropolitaine, in T. Saint-Julien and R. Le Goix (Eds.) *La métropole parisienne. Centralités, inégalités, proximités*. Belin, Paris. p. 11-38.
- Bertuglia C., Bianchi G., Mela A. (eds.) (1998) *The City and Its Sciences*. Physica Verlag, Heidelberg.

- Berube A., Singer A., Wilson J., Frey W. (2006) *Finding exurbia: America's fast-growing communities at the metropolitan fringe*. The Brookings Institution, Washington.
- Biggs R., Schlüter M., Schoon M. (eds.) (2015) *Principles for Building Resilience - Sustaining Ecosystem Services in Social-Ecological Systems*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Bilmes J. (2004) On Virtual Evidence and Soft Evidence in Bayesian Networks. UWEE Technical Report 2004-0016, University of Washington.
- Blecic I. (2012) *Costruzione degli scenari per la pianificazione*. Franco Angeli, Milano.
- Blecic I., Cecchini A. (2016) *Verso una pianificazione antifragile. Come pensare al futuro senza prevederlo*. Franco Angeli, Milano.
- Blondel V. Guillaume J. Lambiotte R. Lefebvre E. (2008) Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 10, P10008, 12 p.
- Blotevogel H.H. (1996) Zur Kontroverse um den Stellenwert des Zentrale-Orte-Konzepts in der Raumordnungspolitik heute. *Informationen zur Raumentwicklung*, 10/1996, 647-657.
- Blotevogel H.H. (2002) *Fortentwicklung des Zentrale-Orte-Konzepts*. Forschungs- und Sitzungsberichte der ARL, Bd. 217, Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Hannover.
- Boarnet M., Crane R. (2001) *Travel by design: The influence of urban design on travel*. Oxford University Press, New York.
- Bolstad W. (2007) *Introduction to Bayesian Statistics*. Second Edition, John Wiley, Chichester.
- Boquet Y., Desse R.-P. (eds.) (2010) *Commerce et mobilité*. Editions Universitaires de Dijon, Dijon.
- Borie A, Denieul F (1984) *Méthode d'analyse morphologique des tissus urbains traditionnels*. UNESCO, Paris. <http://unesdoc.unesco.org/images/0006/000623/062310fb.pdf>
- Borie A., Micheloni P., Pinon P. (1980) *Formes Urbaines et Sites de Méandres*. Ville Recherche Diffusion, Paris.
- Bottazzi G. (2009) On the irreconcilability of Pareto and Gibrat laws. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 388 (7), 1133-1136.
- Bouchon-Meunier B. (1993) *La logique floue*. Presses Universitaires de France, Paris.
- Bourdieu P. (1979) *La distinction. Critique sociale du jugement*. Éditions de Minuit, Paris.
- Bourdin A. (2014) *Métapolis revisitée*. Editions de l'Aube, La Tour d'Aigues.
- Box G., Tiao G. (1973) *Bayesian Inference in Statistical Analysis*. John Wiley, Hoboken, NJ.
- Brasebin M. (2017) Apports des méthodes d'exploration et de distribution appliquées à la simulation des droits à bâtir. *SAGEO 2017 - Proceedings, Rouen 6-9 Novembre 2017*.
- Breheny M. (1997) Urban compaction: feasible and acceptable? *Cities*, 14(4), 209-217.
- Bretagnolle A., Pumain D., Degorge-Lavagne M. (1999) La ville et la croissance urbaine dans l'espace-temps. *Mappemonde*, 55 : 38-42
- Brunet R. (1990) Évaluation et prospective des territoires. In *Conférences sur la géographie*. Ministère de la recherche et de la technologie, Paris, p. 25-44.
- Brunet R., Ferras R., Théry H. (2005) *Les mots de la géographie*. Nouvelle édition, RECLUS / La Documentation Française, Montpellier.
- Bunting T., Filion P. (dir.), 2006, *Canadian Cities in Transition – Local through global Perspectives*, Oxford University Press.
- Byrne D., Callaghan G. (2014) *Complexity Theory and the Social Sciences: The State of the Art*. Routledge, London.

- Caglioni M. (2008) *Le strutture territoriali tra ordine e caso. Un approccio stocastico ai modelli localizzativi*. Dottorato di Ricerca in Scienze e Metodi per la Città e il Territorio Europei. Università degli Studi di Pisa.
- Calthorpe, P. (2011) *Urbanism in the Age of Climate Change*. Island press, Washington.
- Calthorpe P., Fulton W. (2001) *The Regional City: Planning for the End of Sprawl*. Island Press, Washington.
- Camagni R., Capello R., Nijkamp P. (1998) Towards sustainable city policy: an economy-environment-technology nexus. *Ecological Economics*, 24, 103-118.
- Camagni R., Gibelli M., Rigamonti P. (2002) *I costi collettivi della città dispersa*. Alinea, Firenze.
- Campagna M. (2014) The Geographic turns in Social Media: Opportunities of space Planning and Geodesign. In B. Murgante et al. (eds.) *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2014, Proceedings*, Springer, Berlin, 2014, 598-610.
- Campagna M., Floris R., Massa P., Girsheva A., and Ivanov K. (2015) The Role of Social Media Geographic Information (SMGI) in Spatial Planning. In S. Geertman, J. Ferreira, R. Goodspeed, J. Stillwell (eds.) *Planning Support Systems and Smart Cities*, Springer, Berlin.
- Campbell T. (2013) *Beyond Smart Cities: How Cities Network, Learn and Innovate*. Routledge, London.
- Caniggia G., Maffei G. (1979) *Lettura dell'edilizia di base*. Alinea, Firenze.
- Cao X., Handy S., Mokhtarian P. (2006) The Influences of the Built Environment and Residential Self-Selection on Pedestrian Behavior: Evidence from Austin, TX. *Transportation*, vol. 33, n° 1, 1-20.
- Carpenter S., Walker B., Anderies J.M., Abel N. (2001) From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What. *Ecosystems*, 4(2001), 765-781.
- Carpentier S. (2007) Une analyse exploratoire des liens entre mobilité quotidienne et ancrage résidentiel. Vers une approche écologique de la mobilité ? *Articulo – Journal of Urban Research*, no.3, 2007, 20 p.
- Carpentier S. (2010) Modes d'habiter urbains et ruraux : entre continuité et rupture. *Articulo – Journal of Urban Research*, Special Issues 3, 2010, 20 p.
- Carson J., Doyle J. (2000) Highly Optimized Tolerance: Robustness and Design in Complex Systems. *Physical Review Letters*, vol. 84, n° 11, 2529-2532.
- Carvalho R., Penn A. (2004) Scaling and universality in the micro-structure of urban space. *Physica A*, 332, 539–547.
- Casati R., Varzi A. C. (1994) *Holes and Other Superficialities*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Castells M. (2002). Local and Global: Cities in the Network Society. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*, vol. 93, n. 5, 548–558.
- Castells M. (2008) *The social fabric of the networked city*. EPFL Press, Lausanne.
- Castex J., Celeste P., Panerai Ph. (1980) *Lecture d'une ville : Versailles*. Moniteur, Paris.
- Cauvin C. (1984) *Espaces cognitifs et transformations cartographiques. Les conditions de la comparaison des espaces cognitifs : de la carte aux configurations ; exemples de l'espace urbain strasbourgeois*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Strasbourg, Microfiches à Lille n° 85 09 2134
- Cedilnik A., Reinghans P. (2000) Procedural annotation of uncertain information. In *Proceedings of Visualization '00*, IEEE Computer and Society Press, p. 77-84.
- Centi C. (1996). *Le Laboratoire marseillais. Chemin d'intégration métropolitaine et segmentation sociale*. L'Harmattan, Paris.
- Cerdà I. (1867) *Teoría General de la Urbanización*. Edition française par A. Lopez de Aberasturi (2005) *Théorie Générale de l'Urbanisation*. Seuil, Paris.

- Cervero R. (2002) Built environments and mode choice: toward a normative framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol.7, No. 4, 265-284.
- Cervero R., Kockelman K. (1997) Travel Demand and the three Ds: Density, Diversity and Design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 2, No. 3, 199-219.
- Chadwick G. (1971) *A System View of Planning. Towards a Theory of the Urban and Regional Planning Process*. Pergamon Press, New York.
- Charmes E (ed.) (2010) La densification en débat. *Etudes foncières*, numéro spécial, 145, Mai-Juin 2010.
- Chiaradia A., Hillier B., Barnes Y., Schwander Ch. (2009) Residential Property Value Patterns in London - Space Syntax spatial Analysis. In *Proceedings of the 7th International Space Syntax Symposium*, Stockholm, http://www.sss7.org/Proceedings/07%20Urban%20Structures%20and%20Spatial%20Distribution/015_Chiaradia_Hillier_Barnes_Schwander.pdf
- Choay F. (1965) *L'Urbanisme, utopies et réalités : Une anthologie*. Seuil, Paris.
- Choay F. (1994) Le règne de l'urbain et la mort de la ville. In *La Ville, art et architecture en Europe, 1870-1993*. Centre Georges Pompidou, Paris, p. 26-35.
- Christaller W. (1933) *Die zentralen Orte in Süddeutschland*. Gustav Fischer, Jena.
- Christensen K. (1985) Coping with uncertainty in planning. *Journal of the American Planning Association*, 51, 63-73.
- Clark C. (1967) *Population Growth and Land Use*. Macmillan, London.
- Clarke M., Wilson A. (1985). The dynamics of urban spatial structure: the progress of a research programme. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 10(4), 427-451.
- Claval P. (1998) *Histoire de la géographie française de 1870 à nos jours*. Nathan, Paris.
- Conroy Dalton R. (2003) The secret is to follow your nose: Route path selection and angularity. *Environment and Behavior*, 35, 107-131.
- Conseil Général 06 (2009) *Enquête Ménages-Déplacements 2009 des Alpes-Maritimes*. CD-ROM, Conseil Général des Alpes-Maritimes, Nice.
- Conzen M. R. G., (1960) *Alnwick, Northumberland: a study in town-plan analysis*. Institute of British Geographers Publication 27, George Philip, London.
- Conzen M. R. G., (2004) *Thinking about urban form: papers on urban morphology, 1932-1998*. Peter Lang, Oxford.
- Cooper G., Hersovits E. (1992) A Bayesian Method for the Induction of Probabilistic Networks from Data. *Machine Learning*, n° 9, 309-347.
- Couclelis H. (2003) The Certainty of Uncertainty: GIS and the Limits of Geographic Knowledge. *Transactions in GIS*, 7(2), 165-175.
- Coutard O., Lévy J.-P. (dir.) (2010) *Ecologies urbaines*. Economica-Anthropos, Paris.
- Cullen G. (1961) *The Concise Townscape*. Architectural Press, Oxford.
- Cumming G. S. (2011) Spatial resilience: integrating landscape ecology, resilience, and sustainability. *Landscape Ecology*, vol. 26, no. 7, 899-909.
- Curran P. (2002) Forward with Uncertainty. In G. Foody, P. Atkinson (eds.), *Uncertainty in Remote Sensing and GIS*. Wiley, pp. xi-xvi
- Cutini V. (1999) Urban Space and Pedestrian Movement - A Study on the Configurational Hypothesis. *Cybergeo*, n° 111, <https://cybergeo.revues.org/2236>, 9 p.

- Cutini V. (2001) Centrality and Land Use: Three Case Studies on the Configurational Hypothesis. *Cybergeo*, n° 188, <https://cybergeo.revues.org/3936>, 15 p.
- Cutini V. (2003) Lines and Squares: towards a configurational approach to the analysis of open spaces, in *Proceedings of the 4° Space Syntax Symposium*, vol. 2, UCL, London. pp. 49.1-49.14
- Cutini V. (2010) *La rivincita dello spazio urbano. L'approccio configurazionale allo studio e all'analisi dei centri abitati*. PLUS Università di Pisa, Pisa.
- Cutini V. (2013) The city when it trembles. Earthquake destructions, post-earthquake reconstruction and grid configuration. In: Kim, Y. O., Park, H. T., Seo, K. W. (eds.), *Proceedings of the Ninth International Space Syntax*. Sejong University, Seoul.
- Cutini V., Di Pinto V. (2015) On the slopes of Vesuvius: Configuration as a thread between hazard and Opportunity. *Proceedings of the 10th International Space Syntax Symposium*. UCL, London.
- Cutini V., Petri M., Santucci A. (2005) Dalla Space Syntax alla MaPPA: un contributo per l'evoluzione dell'analisi configurazionale. In A. Bruzzo, S. Occelli (eds.) *Le relazioni tra conoscenza e innovazione nello sviluppo dei territori*. Franco Angeli, Milano, p. 351-370
- Da Costa P.C.G., Laskey K.B., Laskey K.J. (2008) PR-OWL: A Bayesian Ontology Language for the Semantic Web. *LNAI 5327*, Springer, Berlin, p. 88-107.
- Da Cunha A., Bochet B., Both J.-F., Mager C., Vuagniaux L. (2004) *Mobilité résidentielle, aspirations des ménages et transformations de l'habitat : l'agglomération lausannoise*. Rapport de recherche, Observatoire de la Ville et du Développement Durable, Lausanne.
- Dauphiné A. (1979) *Espace, Région et Système*. Economica, Paris.
- Dauphiné A. (2003) *La théorie de la complexité chez les géographes*. Anthropos, Paris.
- Dawkins R. (1989) *The Selfish Gene*. 2nd Ed. Oxford University Press, Oxford.
- DDT Isère (2015) *Comment favoriser la densification ?* Direction Départementale du Territoire de l'Isère, Grenoble.
- Debonneuil M. (2007) *L'Espoir économique : vers la révolution du quaternaire*. Bourin, Paris
- Debuschere E. (2009) Segmentation of the Flemish housing market. *ENHR Conference*, Prague, 28.6-1.7.2009.
- De Carlo G. (1966) *Urbino. La storia di una città e il piano della sua evoluzione urbanistica*. Marsilio, Padova.
- Decoupigny F. (2006) Métropolisation des espaces naturels : application à la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. IN J.-L. Klein and C. Tardif (eds.) *Entre réseaux et systèmes. Les nouveaux espaces régionaux*, GRIDEQ – CRDT – CRISES, Rimouski, p. 155-175.
- Delamarre A., Malhomme M.-C. (2002) *La prospective territoriale*. DATAR / La Documentation Française, Paris.
- DeLeon P. (1988) The Contextual Burdens of Policy Design. *Policy Studies Journal*, vol. 17, n° 2, 297-309.
- De Montis A. Caschili S. Chessa A. (2011) Commuter networks and community detection: a method for planning sub regional areas. *Physics and Society*, arXiv:1103.2467, 19 p.
- Dempster A. P. (1967) Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *The Annals of Mathematical Statistics*, 38 (2), 325–339.
- Dempster A. P., Laird N. M., Rubin D. (1977) Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, vol. 39, n° 1, p. 1–38.
- De Ruffray S. (2007) *L'imprécision et l'incertitude en géographie. L'apport de la logique floue aux problématiques de régionalisation*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Paris VII.
- De Sardan J.-P. (1998) Emique. *L'homme*, vol. 38, n. 147, 151-166.

- Diez F., Druzdzel M. (2007) *Canonical Probabilistic Models for Knowledge Engineering*. Technical Report CISIAD-06-01.
- Di Méo G. (2005) Les théories de la complexité font leur chemin en géographie. *Annales de Géographie*, vol. 114, n. 642, 220.
- Dorier E., Berry-Chikhaoui I., Bridier S. (2012) Fermeture résidentielle et politiques urbaines, le cas marseillais. *Articulo - Journal of Urban Research*, 8/2012, <http://articulo.revues.org/1973>.
- Drogoul A. et al. (2013) GAMA: a spatially explicit, multi-level, agent-based modeling and simulation platform, *Proceedings of the PRIMA'13 Conference*. https://www.researchgate.net/publication/237837524_GAMA_A_Spatially_Explicit_Multi-level_Agent-Based_Modeling_and_Simulation_Platform.
- Drouet I. (2007) *Causalité et probabilités : réseaux bayésiens, propensionnisme*. Doctorat en philosophie, Université Paris 1 Sorbonne, Paris.
- Drouet I. (ed.) (2016) *Le bayésianisme aujourd'hui. Fondements et pratiques*. Editions Matériologiques, Paris.
- Druzdzel M., Simon H. (1993) Causality in Bayesian Belief Networks. In *Proceedings of the Ninth Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-93)*, Morgan Kaufmann, San Francisco, p. 3-11.
- Dryzek J. (1993) Policy Analysis and Planning: From Science to Argument. In F. Fischer, J. Forester (eds.) *The Argumentative Turn in Policy Analysis and Planning*. Duke University Press, Durham and London, p. 213-232.
- Duany A., Plater-Zyberk E., Speck J. (2000) *Suburban Nation: The Rise of Sprawl and the Decline of the American Dream*. North Point Press, New York.
- Dubois D. (2006) Possibility Theory and Statistical Reasoning. *Journal Computational Statistics & Data Analysis*, Vol 51, Issue 1, 47-69.
- Dubois D., Prade H. (1988) *Possibility Theory. An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*. Plenum, New York.
- Dubois D., Prade H. (2014) Possibilistic Logic – An Overview. In: D. Gabbay, J. Siekmann, J. Woods (eds.), *Computational Logic*, Volume 9 of the Handbook of The History of Logic, p. 1–59.
- Dubois D., Prade H., Sandri S (1993) On Possibility/Probability Transformations. In: R. Lowen and M. Roubens (eds.) *Fuzzy Logic*, Kluwer, p. 103-112.
- Duckham M., Mason K., Stell J., Worboys M. (2001) A Formal Approach to Imperfection in Geographic Information. *Computer, Environment and Urban Systems*, vol. 25, 80-103.
- Duda R.O., Hart P.E. (1973) *Pattern classification and scene analysis*. John Wiley, New York.
- Dupuy G. (1991) *L'Urbanisme des réseaux : théories et méthodes*. Armand Colin, Paris.
- Dupuy G. (1999) *La dépendance automobile. Symptômes, analyses, diagnostic, traitements*. Anthropos, Paris.
- Dupuy J.P. (1992) *Introduction aux sciences sociales. Logique des phénomènes collectifs*. Ellipses, Paris.
- Dupuy J.P. (2012) *L'Avenir de l'économie : sortir de l'écomystification*. Flammarion, Paris.
- Durkheim E. (1893) *De la division du travail social*. 8^e édition 1967, PUF, Paris.
- Eckert D. (1996) *Évaluation et prospective des territoires*. Reclus / La Documentation française, Paris / Montpellier.
- Ehlschlaeger C., Shortridge A., Goodchild M. (1997) Visualizing Spatial Data Uncertainty Using Animation. *Computers & Geosciences*, vol 23, No. 4, 387-395.
- Emsellem K., Lizard S., Scarella F. (2012) La géoprospective : l'émergence d'un nouveau champ de recherche ? *L'espace géographique*, 2012/2 (Tome 41), 154-168.

- Engels F. (1872-73) *Zur Wohnungsfrage*. Récolte d'articles publiés dans *Der Volkstaat*, 51-53, 103-104 (1872) et 2-3, 12-13, 15-16 (1873), Leipzig.
- Ernstson, H., van der Leeuw, S. E., Redman, C. L., Meffert, D. J., Davis, G., Alfsen, C., and Elmqvist, T. (2010) Urban transitions: on urban resilience and human-dominated ecosystems. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 39(8), 531–545.
- Esposito A., Di Pinto V. (2015) Calm after the storm: The configurational approach to manage flood risk in river cities. *Proceedings of the 10th International Space Syntax Symposium*. UCL, London.
- Étienne M. (dir.) (2010) *La modélisation d'accompagnement : une démarche en appui au développement Durable*. Quae Éditions, Paris.
- European Commission (1996) *European Sustainable Cities. Report of the Expert Group on the Urban Environment, Sustainable City Project*. European Commission, General Direction XI, Brussels
- Ewing E., Cervero R. (2010) Travel and the Built Environment. A Meta-Analysis, *Journal of the American Planning Association*, vol. 76, No. 3, 265-294.
- Faludi A. (1986) *Critical Rationalism and Planning Methodology*. Pion, London.
- Federal Judicial Center (2011) *Reference Manual on Scientific Evidence*. Third Edition, National Research Council of the National Academies, Washington.
- Ferrier J.P. (1983) *Leçons du territoire. Nouvelle géographie de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur*. Édisud, Aix-en-Provence.
- Figueiredo L., Amorim L. (2004) Continuity lines: aggregating axial lines to predict vehicular movement patterns, *Proceedings of the Third Great Asian Streets Symposium*, National University of Singapore, Singapore.
- Figueiredo L., Amorim L. (2005) Continuity lines in the axial system. In A. Van Nes (ed.) *5th International Space Syntax Symposium*, TU Delft, Delft.
- Fisher P. (2005) Models of uncertainty in spatial data. In P. Longley et al. (eds.) *Geographical Information Systems. Principles, Techniques, Management and Applications*, John Wiley, Chichester, p. 191–205.
- Fisher P., Comber A., Wadsworth R. (2006) Approaches to Uncertainty in Spatial Data. In R. Devillers and R. Jeansoulin (eds.) *Fundamentals of Spatial Data Quality*, ISTE/Lavoisier, p. 49–64.
- Flanagin A.J., Metzger M.J. (2008) The credibility of volunteered geographic information. *GeoJournal*, 72, 137-148.
- Folke C., Carpenter S., Elmqvist T., Gunderson L., Holling C.S., Walker B. (2012) Resilience and Sustainable Development: building adaptive capacity in a world of transformation. *Ambio*, 31, 437-440.
- Folke C., Carpenter S., Walker B., et al. (2004) Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35, 557–581.
- Foltête J.-C., Genre-Grandpierre C., Josselin D. (2008) Impacts des réseaux viaires sur les mobilités urbaines : quelques illustrations. In M. Thériault, F. Des Rosiers (eds.) *Information géographique et dynamiques urbaines 1*, Hermès Lavoisier, Paris ? p. 139-166.
- Foltête J.-C., Piombini A. (2007) Urban layout, landscape features and pedestrian usage. *Landscape and Urban Planning*, vol 81, n° 3, 225-234.
- Foody G., Atkinson P. (eds.) (2002) *Uncertainty in Remote Sensing and GIS*. John Wiley, Chichester.
- Forgaci C., Van Timmeren A. (2014) Urban Form and Fitness: Towards a Space-Morphological Approach to General Urban Resilience. *ISDR2014 - 20th Annual International Sustainable Development Research Conference*, University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Forrester J. (1969) *Urban Dynamics*. Pegasus Communications, Waltham, MA.

- Forshaw J.H., Abercrombie P. (1943) *County of London Plan*. Macmillan, London.
- Fortunato S. (2010) Community detection in graphs. *Physics Reports*, arXiv:0906.0612v2.
- Fouchier V. (1997). *Les densités urbaines et le développement durable. Le cas de l'Île-de-France et des villes nouvelles*. Secrétariat Général des Villes Nouvelles, Paris.
- Fouchier V., Merlin P. (Eds.) (1994) *High Urban Densities – A Solution for our Cities?* Consulate General of France in Hong Kong.
- Frankhauser P. (1994) *La fractalité des structures urbaines*, Economica, Paris.
- Freeman L. (1977) A set of measures of centrality based betweenness. *Sociometry*, 40, 35-41
- Freeman L. (1979) Centrality in social networks: conceptual clarification. *Social Networks* 1, 215-239.
- Fujiwara Y., Di Guilmi C., Aoyama H., Gallegati M., Souma W. (2004) Do Pareto-Zipf and Gibrat laws hold true? An analysis with European firms. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 335 (1-2), 197-216.
- Garreau J. (1992) *Edge city: Life on the New Frontier*. Anchor Books, New York.
- Geddes P. (1915) *Cities in Evolution: an Introduction to the Town Planning Movement and to the Study of Civics*. Williams & Norgate, London.
- Gehl J. (1987) *Life Between Buildings*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Genre-Grandpierre C., Foltête J. (2003) Morphologie urbaine et mobilité en marche à pied. *Cybergeo*, n. 248, <http://cybergeo.revues.org/3925>.
- Genre-Grandpierre C. (2014) *Vitesse de déplacement et durabilité en milieu urbain. La possibilité d'une métrique*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.
- Gérardot M. (2007) Penser en rythmes. *EspaceTemps.net*, Travaux, <http://www.espacestemp.net/articles/penser-en-rythmes/>
- Giannopoulou M. et al. (2014) Using GIS to Record and Analyse Historical Urban Areas. *Tema - Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 4-2014, 43-47.
- Gibson J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin Company, Boston.
- Gil J., Beirão J.N., Montenegro N., Duarte J. (2012) On the discovery of urban typologies: data mining the many dimensions of urban form. *Urban Morphology*, 16(1), 27-40.
- Giuliano G., Narayan D. (2003) Another look at travel patterns and urban form: The US and Great Britain. *Urban Studies*, Vol 40, n. 11, 2295-2312.
- Godet M. (2007) *Manuel de prospective stratégique*. 2 volumes. Paris, Dunod.
- Gomez-Perez A. (1999) Développements récents en matière de conception, de maintenance et d'utilisation des ontologies. *Terminologies Nouvelles*, 19, 9-20.
- Gordon P., Richardson H. (1989) Gasoline Consumption and Cities: A Reply. *Journal of the American Planning Association*, vol. 55, n. 3, 342-346.
- Gordon P., Richardson H. (1996) Beyond Polycentricity: The Dispersed Metropolis, Los Angeles 1970-1990. *Journal of the American Planning Association*, 62(3), 289-295.
- Gordon P., Richardson H. (1997) Are Compact Cities a Desirable Planning Goal? *Journal of the American Planning Association*, 63(1), 95-106.
- Gourmelon F., Houet T., Voiron-Canicio Ch., Joliveau T. (2012) La géoprospective, apport des approches spatiales à la prospective. *L'espace géographique*, 2012/2 (Tome 41), 97-98.
- GRA (2005) *Programme de Rénovation Urbaine de l'agglomération grenobloise*. Grenoble Alpes-Métropole, Grenoble.

- Graff Ph. (2000) *L'exception Urbaine. Nice : de la Renaissance au Consiglio d'Ornato*. Parenthèses, Marseille.
- Graff Ph. (2014) *Une ville d'exception. Nice, dans l'effervescence du 20^e siècle*. Serre, Nice.
- Grant J. (2006) *Planning the Good Community: New Urbanism in Theory and Practice*. Routledge, London.
- Grignon C. (2008) La réfutation dans les sciences historiques. *Revue européenne des sciences sociales*, XLVI-142, <http://ress.revues.org/131>
- Guerin J.-P., Gumuchian H. (1979) Ruraux et rurbains. Réflexions sur les fondements de la ruralité aujourd'hui. *Révue de géographie alpine*, 67(1), 89-104.
- Guigo M., Davoine P.-A., Dubus N., Guarnieri F., Richard B., Bailly B. (1995) *Gestion de l'environnement et systèmes experts*. Masson, Paris.
- Habraken N.J. (1998) *The Structure of the Ordinary. Form and Control in the Built Environment*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Haggett P. Cliff A. Frey A. (1977) *Locational Analysis in Human Geography*. Edward Arnold, London.
- Halbwachs M. (1938) *Morphologie Sociale*. Armand Colin, Paris.
- Haken H. (1978) *Synergetics, an Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry, and Biology*. Springer, Berlin.
- Halkidi M., Batistakis Y., Vazirgiannis M. (2001) On Clustering Validation Techniques. *Journal of Intelligent Information Systems*, 17:2/3, 107-145.
- Halpern J. (2005) *Reasoning about Uncertainty*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Hansen W. (1959) How accessibility shapes land use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73–76.
- Harris C., Ullman E. (1945) The Nature of Cities. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*. 242, 7–17.
- Harris B, Wilson A. (1978) Equilibrium values and dynamics of attractiveness terms in production-constrained spatial-interaction models. *Environment and Planning A*, 10(4), 371–388.
- Harvey D. (1969) *Explanation in Geography*. St. Martin's Press, New York.
- Harvey D. (1973) *Social Justice and the City*. University of Georgia Press, Athens, GA.
- Harvey D. (1985) *The Urbanization of Capital*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Hayek F. (1967) *Studies in Philosophy, Politics and Economics*. Routledge, London.
- Hayek F. (1978) *New Studies in Philosophy, Politics, Economics and the History of Ideas*. Routledge, London.
- Healey P. (2006) *Urban Complexity and Spatial Strategies. Towards a Relational Planning for Our Times*. Routledge, London.
- Henrion M. (1989) Some practical issues in constructing belief networks. In L. Kanal, T. Levitt, J. Lemmer (eds.), *Uncertainty in Artificial Intelligence 3*, Elsevier, p. 161-173.
- Heuvelink G. (2002) Analysing Uncertainty Propagation in GIS: Why is it not that Simple In G. Foody, P. Atkinson (eds.), *Uncertainty in Remote Sensing and GIS*, Wiley, Chichester, p. 155-166.
- Heuvelink G. (2007) Error-Aware GIS at Work: Real World Applications of the Data Uncertainty Engine. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 34, Part XXX, [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/2-C43/Keynotespeakers/Heuvelink_paper\[1\].pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/2-C43/Keynotespeakers/Heuvelink_paper[1].pdf)
- Hidalgo C., Castañer E. (2015) Do we need another coffee house? The amenity space and the evolution of neighborhoods, arXiv:1509.02868 [physics.soc-ph].
- Hillier B. (1996) *Space is the machine*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Hillier B. (2002) A theory of the city as object. *Urban Design International*, vol. 7, 153-179.
- Hillier B. (2012) The Genetic Code for Cities: Is It Simpler than We Think? In J. Portugali et al. (Eds.) *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*. Springer, Berlin, p. 129-152.
- Hillier B. (2014) Space Syntax as a theory as well as a method. *ISUF 2014, Porto, Portugal 3-6 July 2014*, <http://isuf2014.fe.up.pt/Hillier.pdf>
- Hillier B., Hanson J. (1984) *The Social Logic of Space*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hillier B., Iida S. (2005) Network and psychological effects in urban movement. In A.G. Cohn, D.L. Mark (eds.) *Spatial Information Theory: COSIT 2005. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3693, 475-490.
- Hillier B., Penn A., Hanson J., Grajewski T. Xu J. (1993) Natural movement: or, configuration and attraction in urban pedestrian movement. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 20, 29-66.
- Hofmeister B. (2004) The study of urban form in Germany. *Urban Morphology*, 8, 3-12.
- Holland J. (1995) *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Addison-Wesley, Reading.
- Holland J. (1998) *Emergence: From Chaos to Order*. Addison-Wesley, Reading.
- Holling C.S. (1973) Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, vol. 4, 1-23.
- Holling, C. S., Sanderson S. (1996) Dynamics of (dis) harmony in ecological and social systems. In S. Hanna, C. Folke, K. G. Mäler (eds.) *Rights to nature: ecological, economic, cultural, and political principles of institutions for the environment*. Island Press, Washington, p. 57-86.
- Houet T., Gourmelon F. (2015) La géoprospective – Apport de la dimension spatiale aux démarches prospectives. *Cybergeo*, n° 667, <http://journals.openedition.org/cybergeo/26194>
- Howard E. (1902) *Garden-Cities of Tomorrow*. Swan Sonnenschein & Co., London.
- Ignizio J. (1991) *Introduction to Expert Systems: The Development and Implementation of Rule-based Expert Systems*. McGraw Hill, New York.
- Indovina F. (ed.) (1990) *La città diffusa*. DAEST, Venezia.
- Indovina F. (ed.) (2009) *Dalla città diffusa all'arcipelago metropolitano*. Franco Angeli, Milano.
- Innes J.E., Booher D.E. (2010) *Planning with Complexity: An Introduction to Collaborative Rationality for Public Policy*. Routledge, London.
- Isard W. (1956) *Location and Space-economy; a General Theory Relating to Industrial Location, Market Areas, Land Use, Trade, and Urban Structure*. MIT Press / Wiley, Cambridge, MA.
- Jacobs J. (1961) *The Death and Life of Great American Cities*. Random House, New York.
- Jacobs J. (1970) *The Economy of Cities*. Vintage Books, New York.
- Jacobs J. (2000) *The Nature of Economies*. Vintage Books, New York.
- Jaynes E. (1968) Prior Probabilities. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 4 (3), 227-241.
- Jaynes E. (2003) *Probability Theory: The Logic of Science*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jensen F. (2001) *Bayesian Networks and Decision Graphs*. Springer, Berlin.
- Jensen P. (2006) A network-based prediction of retail stores commercial categories and optimal locations. *Physical Review E : Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, American Physical Society, 74, 035101. <hal-00090415>
- Jiang B. (2013). The Image of the city out of the underlying scaling of city artifacts or locations. *Annals of the Association of American Geographers*, 103 (6), 1552-1566.

- Jiang B. (2015a). Head/tail breaks for visualization of city structure and dynamics. *Cities*, 43, 69-77.
- Jiang B. (2015b). A city is a complex network. In *A City is Not a Tree : 50th Anniversary Edition*. Sustasis Press, Portland, OR, p. 89-100.
- Jiang B., Claramunt Ch. (2004) Topological analysis of urban street network, *Environment and Planning B*, 31(1), 151-162.
- Jordan M. I. (ed.) (1998) *Learning in Graphical Models*, MIT Press, Boston.
- Jordan T. et al. (1998) An Affordance-Based Model of Place in GIS. In T. Poiker and N. Chrisman (eds.) *Eighth International Symposium of Spatial Data Handling*, Vancouver, July 1998, p. 98-109.
- Josang A., Haller J (2007) Dirichelet Reputation Systems. *Proceedings of the 2nd International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES 2007)*.
- Kaplan D. (2010) *Structural Equation Modeling: Foundations and Extensions*. SAGE Publications, London.
- Kaufmann V. (2000) *Mobilité quotidienne et dynamiques urbaines. La question du report modal*. Presses Polytechniques Universitaires Romandes, Lausanne.
- Kaufmann V. (2004) La mobilité au quotidien : nécessité, proposition et test d'une nouvelle approche. In L. Vodoz et al. (eds.) *Les territoires de la mobilité. L'aire du temps*, PPUR, Lausanne, p. 57-69.
- Kaufmann V. (2007) La motilité : une notion clé pour revisiter l'urbain ? In D. Joye, V. Kaufmann, M. Bassand (eds.) *Enjeux de la sociologie urbaine*, PPUR, Lausanne, p. 87-102.
- Kauko T. (2006) Expressions of Housing Consumer Preferences: Propositions for a Research Agenda. *Housing, Theory and Society*, vol.23, no. 2, 92-108.
- Keita A.K. (2007) *Conception Coopérative d'Ontologies Pré-Consensuelles : Application au domaine de l'Urbanisme*. Thèse de doctorat, INSA, Lyon.
- Kigawa T., Furuyama M. (2005) Kyoto - A Morphological Cycle between a city of rituals and a city of games. *Proceedings 5th International Space Syntax Symposium*, Vol. II, Techne Press, Delft, p. 697-713.
- Kigawa T., Seo K.W. (2009) Using Space Syntax to trace the Japanese urban renovation from Jyokamachi to modern cities - What formed the city, the Centre or the Boundary? *Proceedings of the 7th international Space Syntax Symposium*, p. 053:1-12.
- Kii M, Doi K. (2005) Multiagent land-use and transport model for the policy evaluation of a compact city. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32 (2005), 485-504
- Kipnis B. A. (1985) Graph Analysis of Metropolitan Residential Mobility: Methodology and Theoretical Implications. *Urban Studies*, 22, 179-187.
- Klosterman R. E. (1994) Large-scale urban models: retrospect and prospect. *Journal of the American Planning Association*, 60, 3-6
- Knight F.H. (1921) *Risk, Uncertainty, and Profit.*, Hart, Schaffner & Marx, Boston.
- Knox P. (ed.) *The Restless Urban Landscape*. Prentice-Hall, Englewood Cliff, NJ.
- Koch D., Miranda Carranza P. (2013) Syntactic Resilience. In *Proceedings of Ninth International Space Syntax Symposium*. Sejong University Press, Seoul.
- Kohonen T. (1989) *Self-organizing and associative memory*. 3rd edition. Springer, Berlin.
- Korb K., Nicholson A. (2004) *Bayesian Artificial Intelligence*. Chapman & Hall / CRC, Boca Raton, FA.
- Kropf K. (2001) Conceptions of change in the built environment. *Urban Morphology*, 5(1), 29-42.
- Kuhn T. (1962) *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press, Chicago.

- Kwakkel J., Pruyt E. (2011) Exploratory Modelling and Analysis, an approach for model-based foresight under deep uncertainty. In Effie Amanatidou et al. (eds.) *The 4th International Seville Conference on Future-Oriented Technology Analysis. FTA*, Sevilla, p. 1-20.
- Lacour C., Puissant S. (eds.) (1999) *La métropolisation - Croissance, diversité et fractures*. Anthropos, Paris.
- Lagesse C. (2015) *Lier les lignes de la Ville. Méthodologie de caractérisation des graphes spatiaux*. Thèse de doctorat en Physique. Université Paris 7 Diderot, Paris.
- Lane D. (2006) Hierarchy, Complexity, Society. In D. Pumain (ed.) *Hierarchy in Natural and Social Sciences*, Springer, Berlin, p. 81-119.
- Lane D., Maxfield R. (2005) Ontological uncertainty and innovation. *Journal of Evolutionary Economics*, 15, 3-50.
- Larkham P.J., Morton N. (2011) Drawing lines on maps: morphological regions and planning practices. *Urban Morphology*, 15, 133–151.
- Laugier R. (2012) *L'étalement urbain en France. Synthèse documentaire*. Centre de Ressources Documentaires Aménagement Logement Nature. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, Paris.
- Lavedan P. (1926) *Qu'est-ce que l'urbanisme ?* Taffin-Lefort, Paris.
- Lavedan P. (1936) *Géographie des villes*. Gallimard, Paris.
- Lavedan P. (1960) *Les villes françaises*. Vincent et Fréal, Paris.
- Lanzendorf M. (2002). Mobility styles and travel behavior: Application of a lifestyle approach to leisure travel. *Transportation Research Record*, n. 1807, 163-173.
- Lebart L., Salem A., Berry L. (1998) *Exploring Textual Data*. Kluwer-Academic Publisher, Boston.
- Le Corbusier (1924) *Urbanisme*. Collection l'Esprit Nouveau, Crès, Paris.
- Le Corbusier (1943) *La Charte d'Athènes*. Adaptation pour la publication (édition originale : Le groupe CIAM – France). Plon, Paris.
- Le Moigne, J.-L., Morin E. (dir.) (2007) *Intelligence de la complexité. Épistémologie et pragmatique*. Colloque de Cerisy, juin 2005, Éditions de l'Aube, La Tour d'Aigues.
- Lee D. (1973) Requiem for large scale urban models. *Journal of the American Institute of Planners*, 39(3), 163-178.
- Lefebvre H. (1992) *Éléments de la rythmanalyse. Introduction à la connaissance des rythmes*. Syllepse, Paris.
- Le Néchet F. (2011). Consommation d'énergie et mobilité quotidienne selon la configuration des densités dans 34 villes européennes. *Cybergeo*, n. 529, <http://cybergeo.revues.org/23634>.
- Lepetit B., Topalov C. (eds.) (2001) *La ville des sciences sociales*. Belin, Paris.
- Lerman Y., Rofé Y., Omer I. (2014) Using Space Syntax to Model Pedestrian Movement in Urban Transportation Planning. *Geographical Analysis*, 46, 392–410.
- Leroy S. (2000) Sémantiques de la Métropolisation. *L'espace géographique*, 1(2000), 78-86.
- Levin S. (2002) Complex Adaptive Systems: Exploring the Known, the Unknown and the Unknowable. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 40(1), 3-19.
- Lévy A. (1999) Urban morphology and the problem of the modern urban fabric: some questions for research. *Urban Morphology* 3(2), 79-85.
- Lévy A. (2005) Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine. *Espace et Sociétés*, 122, 25-48.
- Lévy J. (1999) *Le Tournant géographique*. Belin, Paris.

- Levy S. (1977) Defeasibility Theories of Knowledge. *Canadian Journal of Philosophy*, VII(1), 115-123.
- Lhomme S. (2012) *Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain. Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine*. Thèse de doctorat en géographie, Université Paris-Diderot.
- Lin C.-R., Liu K.-H., Chen M.-S. (2005) Dual Clustering: Integrating Data Clustering over Optimization and Constraint Domains. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 17(5), 628-637.
- Lin J. (1991) Divergence Measures Based on the Shannon Entropy. *IEEE Transactions on Information Theory*, 37(1), 145-151.
- Lin J., Yang A. (2009) Structural Analysis of How Urban Form Impacts Travel Demand: Evidence from Taipei. *Urban Studies*, 46(9), 1951-1967.
- Lindstrom M. (2016) *Small Data: The Tiny Clues that Uncover Huge Trends*. St. Martin's Press, New York.
- Loinger G., Spohr C. (2005) Prospective et planification territoriales, état des lieux et propositions. *Travaux et recherches de prospective*, No. 24.
- Long N., Tonini B. (2012) Les espaces verts urbains : étude exploratoire des pratiques et du ressenti des usagers. *Vertigo*, vol. 12, n° 2, septembre 2012, <http://journals.openedition.org/vertigo/12931>.
- Long N., Kergomard C. (2005) Classification morphologique du tissu urbain pour des applications climatologiques. Le cas de Marseille. *Revue Internationale de Géomatique*, 15(14), 487-512.
- Longley P., Goodchild M., Maguire D., Rhind D. (2005) *Geographical Information Systems. Principles, Techniques, Management and Applications*, John Wiley, Chichester.
- Loos A. (1913) Ornament and Crime. *Cahiers d'aujourd'hui*, 5 (June 1913), 247-256.
- Lorenz E. N. (1963) Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 130-148.
- Lösch A. (1940) *Die räumliche Ordnung der Wirtschaft. Eine Untersuchung über Standort, Wirtschaftsgebiete und internationalem Handel*. Fischer, Jena.
- Loubier J.-C. (2006) Construction interactive de maquettes numériques de territoire. *Revue Internationale de Géomatique*, 16(1), 93-114.
- Lucy W., Philips D. (1997) The post-suburban era comes to Richmond : City decline, suburban transition, and exurban growth. *Landscape and urban planning*, 36(4), 259-275.
- Lynch K. (1960) *The Image of the City*. MIT Press, Cambridge, MA.
- MacEachren A. (1992) Visualizing uncertain information. *Cartographic Perspective*, 13, 10-19.
- MacEachren A. M., Howard D., et al. (1993) Visualizing the health of Chesapeake Bay: An uncertain endeavor. In *GIS/LIS Proceedings*, vol. 1, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda MD, p. 449-458.
- MacFarlane A. (2013) Information, Knowledge and Intelligence. *Philosophy Now*, 98, 18-20.
- MacKay D. (2003) *Information theory, inference and learning algorithms*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Mandelbrot B. (1982) *The Fractal Geometry of Nature*. Henry Holt and Company, New York.
- Manson S. (2001) Simplifying Complexity: a review of complexity theory. *Geoforum*, n. 32, 405-414.
- Marcot B., Steventon J., Sutherland G., McCann R. (2006) Guidelines for developing and updating Bayesian belief networks applied to ecological modeling and conservation. *Canadian Journal of Forest Research*, 36: 3063-74.
- Marcus L., Colding J. (2014) Toward an integrated theory of spatial morphology and resilient urban systems. *Ecology and Society*, 19(4), 55. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-06939-190455>

- Marquis P., Papini O., Prade H. (eds.) (2014) *Panorama de l'Intelligence Artificielle. Ses bases méthodologiques et ses développements*. 3 volumes, Cepaduès, Toulouse.
- Marshall S. (2005) *Streets and Patterns*. Spon Press, London.
- Marshall S. (2009) *Cities, Design and Evolution*. Routledge, London.
- Marshall S. (2012) Planning, Design and the Complexity of Cities. In J. Portugali et al. (eds.) *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*. Springer, Berlin, p. 191-205.
- Martin L., March L., Echenique M. (1972) *Urban Spaces and Structures*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Marx K. (1867) *Das Kapital, Kritik der politischen Ökonomie. Erster Band*. Otto Meissner, Hamburg.
- Masson Vincent M. et al. (2012) La géogouvernance : un concept novateur ? *Cybergeo*, n° 587, <http://journals.openedition.org/cybergeo/25086>.
- McCulloch W., Pitts W. (1943) A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*. 5 (4), 115–133.
- McGee T. (1991) The Emergence of Desakota Regions in Asia: Expanding a Hypothesis. In N. Ginsburg, B. Koppel, T. McGee (eds.) *The Extended Metropolis: Settlement Transition In Asia*. University of Hawaii Press, Honolulu. pp. 3–25
- McLoughlin B. (1969) *Urban and Regional Planning: A Systems Approach*. Faber & Faber, London.
- Mehaffy M., Salingaros N. (2013) Towards Resilient Architectures I: Biology Lessons. *Metropolismag.com*, March 2013. <http://www.resilience.org/stories/2013-03-25/toward-resilient-architectures-i-biology-lessons/>
- Mehdi L., Weber Ch., Di Pietro F., Selmi W. (2012) Évolution de la place du végétal dans la ville, de l'espace vert à la trame verte. *Vertigo*, vol. 12, n° 2, septembre 2012, <http://journals.openedition.org/vertigo/12670>
- Merlin P., Choay F. (1988) *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*, PUF, Paris.
- Merton R. (1968) *Social Theory and Social Structure*. Third Edition, Columbia University, New York.
- Meslin K., Rousselot L. (2013) Effets sociaux des politiques urbaines de démolition et reconstruction du logement social. De l'ascension résidentielle à la fragilisation socio-économique. *Revue des politiques sociales et familiales*. 114(2013), 81-87.
- Meyronin B. (2003) De la cité industrielle à la métropole informationnelle : une perspective historique sur la relation ville-industrie. *RERU*, 2003/1, 153-172.
- Mirloup J. (1983) Région, polarisation de l'espace par les grandes villes et loisirs de proximité. *Norois*, n° 120, octobre-décembre 1983, 663-668.
- Moreno D., Badariotti D., Banos A. (2012) Un automate cellulaire pour expérimenter les effets de la proximité dans le processus d'étalement urbain : le modèle Raumus. *Cybergeo*, n. 606, <https://cybergeo.revues.org/3804>
- Morin E. (1990) *Introduction à la pensée complexe*. Seuil, Paris.
- Morin E. (1994) *La Complexité humaine*. Champs Flammarion, Paris.
- Morin E. (2006) *La Méthode*. 6 volumes, collection Opus, Seuil, Paris.
- Moroni S. (2010) Rethinking the theory and practice of land-use regulation: Towards nomocracy. *Planning Theory*, vol. 9, 137–155
- Moroni S. (2015) Complexity and the inherent limits of explanation and prediction: Urban codes for self-organizing cities. *Planning Theory*, vol. 14(3), 248-267.
- Mumford L. (1961) *The City in History: Its Origins, Its Transformations, and Its Prospects*. Harcourt Inc, San Diego.
- Muratori S. (1959) *Studi per una operante storia di Venezia*. Istituto Poligrafico dello Stato, Roma.

- Naess, P. (1995) *Urban Form and Energy Use for Transport. A Nordic Experience*. NTH, Oslo.
- Newman M. (2004) Fast algorithm for detecting community structure in networks. *Phys. Rev. E* 69, 066133, p. 1-5.
- Newman M. (2006) Power Laws, Pareto distributions and Zipf's law. arXiv:cond-mat/0412004v3.
- Newman P., Beatley T., Boyer H. (2009) *Resilient cities: Responding to peak oil and climate change*. Island Press, Washington.
- Newman P., Kenworthy J. (1989) *Cities and Automobile Dependence: A Sourcebook*. Gower Technical, Aldershot Hants, England.
- Newman P., Kenworthy J. (1998) *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*. Island Press, Washington.
- Newmann P., Jennings I. (2009) *Cities as sustainable ecosystems, Principles and Practices*. Island Press, Washington.
- Noulas A., Scellato S., Lambiotte R., Pontil M., Mascolo C. (2012) A Tale of Many Cities: Universal Patterns in Human Urban Mobility. *PLOS ONE*, 7(9), <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0037027>
- Nystuen J.D., Dacey M.F. (1961) A Graph Theory Interpretation of Nodal Regions. *Papers and Proceedings of the Regional Science Association*, 7, 29-42.
- Occelli S. (2002) Facing urban complexity: towards cognitive modelling. Part 1. Modelling as a cognitive mediator, *Cybergeo*, 209, <http://journals.openedition.org/cybergeo/4179>
- Offner J.-M. (1993) Les « effets structurants » du transport : mythe politique, mystification scientifique. *L'espace géographique*, 22-3, 233-242.
- Okabe A., Sugihara K. (2012) *Spatial Analysis along Networks: Statistical and Computational Methods*. Wiley series of Statistics in Practice, John Wiley, Hoboken, NJ.
- Omer I., Gabay R. (2007) Social Homogeneity and Space Syntax of Towns in Israel. *International Space Syntax Symposium*, p. 108.1-108.6.
- Omer I., Goldblatt R. (2016) Using space syntax and Q-analysis for investigating movement patterns in buildings: the case of shopping malls, *Environment and planning B: Planning and Design*, 26, 241-250.
- Omer I., Zafrir-Reuven O. (2010) Street patterns and spatial integration of Israeli cities. *The Journal of Space Syntax*, 1 (2), p. 280-295.
- Ortiz-Chao C., Hillier B. (2007) In search of patterns of land-use in Mexico using logistic regression at the plot level. In Proceedings of the 6th Space Syntax International Symposium, Istanbul, <http://www.spacesyntaxistanbul.itu.edu.tr/papers%5Clongpapers%5C016%20-%20Ortiz-Chao%20Hillier.pdf>
- O'Sullivan D. (2004) Complexity science and human geography. *Transactions of the Institute of British Geographers*, NS 29, 282-295.
- Palla G., Derényi I., Farkas I., Vicsek T. (2005) Uncovering the overlapping community structure of complex networks in nature and society. *Nature*, 435, 814-818.
- Pan R., Peng Y., Ding Z. (2006) Belief Update in Bayesian Networks Using Uncertain Evidence. *Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI'06)*, IEEE: 441 – 444
- Panerai Ph., Castex J., Depaule J.-P. (1997) *Formes urbaines : de l'îlot à la barre*. Parenthèses, Marseille.
- Passeron J.-C. (1991) *Le Raisonnement sociologique. L'espace non-poppérien du raisonnement naturel*. Nathan, Paris.

- Pearl J. (1985) Bayesian networks: A model of self-activated memory for evidential reasoning. *Proceedings of the 7th Conference of the Cognitive Science Society*, University of California, p. 329-334.
- Pearl J. (2000) *Causality: Models, Reasoning and Inference*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Pearl J., Russell S. (2000) *Bayesian Networks*. Working paper, University of California, Los Angeles.
- Pena-Vega, A. et Proutheau, S. (eds.) (2011) Edgar Morin, aux risques d'une pensée libre. *Hermès*, n°60, CNRS Editions, juillet 2011.
- Penn A., Hillier, B., Bannister, D., Xu, J., (1998) Configurational modelling of urban movement networks, *Environment and planning B*, 25, 59-84.
- Peponis J., Ross C., Rashid M. (1997) The structure of urban space, movement and co-presence: The case of Atlanta. *Geoforum*, 28 (3), 341-358.
- Petersen A.C. (2012) *Simulating Nature: A Philosophical Study of Computer-Simulation Uncertainties and their Role in Climate Science and Policy Advice*. CRC Press, Chapman & Hall.
- Phillips J. (1999) Divergence, convergence and self-organization in landscapes. *Annals of the Association of American Geographers* 89, 466-488.
- Pinho P., Oliveira V. (2009) Cartographic analysis in urban morphology. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36, 107-127.
- Pinjari A. et al. (2011). Modeling the choice continuum: an integrated model of residential location, auto ownership, bicycle ownership, and commute tour mode choice decisions. *Transportation*, vol. 38, 933-958.
- Pinon P. (1991) *Lire et composer l'espace public*. Direction de l'Architecture et de l'Urbanisme, Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et de la Mer, Paris.
- Piombini A. (2006) *Modélisation des choix d'itinéraires pédestres en milieu urbain. Analyse géographique et paysagère*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Besançon.
- Piombini A., Leduc T., Woloszyn P. (2014) Usage de la morphométrie dans la révélation des préférences de mobilité. Application aux cheminements piétons. *Revue Internationale de Géomatique*, vol 24, 101-130.
- Plewe B. (2002) The Nature of Uncertainty in Historical Geographic Information. *Transactions in GIS*, 6(4), 431-456.
- Poincaré H. (1908) *Science et Méthode*. Flammarion, Paris.
- Polanyi M. (1966) *The Tacit Dimension*. University of Chicago Press, Chicago.
- Popper K. (1963) *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. Routledge, London.
- Porta S., Crucitti P., Latora V. (2006a) The network analysis of urban streets: a primal approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33(5), 705-725.
- Porta S., Crucitti P., Latora V. (2006b) The network analysis of urban streets: A dual approach. *Physica A*, 369(2006): 853-866.
- Porta S., Latora V., Latora L., Wang F., Rueda S., Strano E., Scellato S., Cardillo A., Belli E., Cardenas F., Cormenzana B. (2012) Street centrality and the location of economic activities in Barcelona. *Urban Studies*, Vol 49, No. 7, 1471-1488.
- Porta S., Latora V., Wang F., Scellato S. (2009) Street centrality and densities of retail and services in Bologna – Italy. *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 36, p. 450-465.
- Porta S., Latora V., Strano E. (2010) Networks in urban design. Six years of research in multiple centrality assessment. In Estrada et al. (eds.) *Network science complexity in nature and technology*, Springer, p. 107-130.
- Porter M. Onnela J. Mucha P. (2009) Communities in Networks, *Notices of the AMS*, 56(9), 1082-1097.

- Portugali J. (2000) *Self-Organisation and the City*. Springer, Berlin.
- Portugali J., Meyer H., Stolk E., Tan E. (eds.) (2012) *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*. Springer, Berlin.
- Potzamparc Ch. (1997) *La ville âge III*. Pavillon de l’Arsenal, Paris.
- Prade H., Jeansoulin R., Papini O., Schockaert S. (eds.) (2010) *Methods for Handling Imperfect Spatial Information*. Springer, Berlin.
- Prigogine I., Nicolis, G. (1977) *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*. John Wiley, Chichester.
- Prigogine I., Stengers, I. (1984) *Order out of Chaos: Man's new dialogue with nature*. Flamingo, London.
- PUCA (2014) *Vers des politiques publiques de densification et d'intensification douces ?* Workshop proceedings. <http://www.urbanisme-puca.gouv.fr/IMG/pdf/S2-politiques-publiques-de-densification-douces-2.pdf>, June 2014.
- Puissant A et al. (2010) Classification des tissus urbains à partir de données vectorielles – Application à Strasbourg. *SAGEO 2010 Proceedings*, Toulouse, 198-211.
- Pumain D. (1998) Urban Research and Complexity. In Bertuglia, G. Bianchi, A. Mela (Eds.) *The City and Its Sciences*. Physica Verlag, Heidelberg, p. 323-361.
- Pumain D. (ed.) (2006) *Hierarchy in Natural and Social Sciences*. Springer, Berlin.
- Pumain D. (2012) Urban Systems Dynamics, Urban Growth and Scaling Laws: The Question of Ergodicity. In Portugali, H. Meyer, E. Stolk, E. Tan (eds.) *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*. Springer, Berlin, p. 91-104.
- Pumain D., Reuillon R. (2017) *Urban Dynamics and Simulation Models*. Springer, Berlin.
- Pumain D., Saint-Julien Th. (1997) *L’analyse spatiale : localisations dans l’espace*. Armand Colin, Paris.
- Pumain D., Sanders L., Saint-Julien T. (1989) *Villes et auto-organisation*. Economica, Paris.
- Quine W. (1953) *From a Logical Point of View*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Rabino G. (2005) *Processi decisionali e territorio nella simulazione multi-agente*. Esculapio, Bologna.
- Rabino G. (1998) Selected Issues of Urban Planning. In C. Bertuglia, G. Bianchi, A. Mela (Eds.) *The City and Its Sciences*. Physica Verlag, Heidelberg, p. 577-595.
- Rabino G., Occelli S. (1997) Understanding spatial structure from network data: theoretical considerations and applications. *Cybergeo*, n°29, <http://www.cybergeo.eu/index2199.html>
- Rabino G., Scarlatti F. (2009) Science of complexity and planning: the new ICT link. In G. Rabino, M. Cagliani (eds.), *Planning, Complexity and New ICT*, Alinea, Firenze.
- Raftery A. (1995a) Bayesian model selection in social research. *Sociological Methodology*, 25, 111-163.
- Raftery A. (1995b) Rejoinder: model selection in unavoidable in social research. *Sociological Methodology*, 25, 185-195.
- Ramezani S., Pizzo B., Deakin E. (2017) An integrated assessment of factors affecting modal choice: towards a better understanding of the causal effects of built environment. *Transportation*, online Feb 2017, 1-37.
- Ratti C. (2004) Space syntax: some inconsistencies. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31 (4), 501–511.
- Ratti C. (2013) *Smart City, Smart Citizen*. Egea, Milano.
- Ratti C. (2017) *The City of Tomorrow*. Yale University Press, New Haven / London.
- Ravenstein E. (1885) The laws of migration. *Journal of the Statistical Society of London*, 48(2), 167-235.

- Raymond M.-J. (1968) Idéologies du logement et opposition ville-campagne. *Revue française de sociologie*, 9(2), 191-210.
- Reilly W. (1931) *The Law of Retail Gravitation*. Knickerbocker Press, New York.
- Relph E. (1976) *Place and placelessness*. Pion, London.
- Renkema J. (2004) *Introduction to Discourse Studies*. John Benjamins, Amsterdam.
- RERC (1974) *The Costs of Sprawl*. 2 volumes, Real Estate Research Corporation, Washington.
- Reuillon R., Leclair M., Passerat-Palmbach J. (2015) Model Exploration Using OpenMOLE a workflow engine for large scale distributed design of experiments and parameter tuning. *IEEE High Performance Computing and Simulation conference 2015*, arXiv:1506.04182v1
- Ricardo D. (1817) *On the Principles of Political Economy and Taxation*. John Murray, London.
- Richardson B.W. (1886) *Hygeia, A City of Health*. MacMillan, London.
- Rocha L., Lorente S., Bejan A. (2013) *Constructal Law and the Unifying Principle of Design*. Springer, Berlin.
- Rodriguez D., Joo J. (2004). The relationship between non-motorized mode choice and the local physical environment. *Transportation Research Part D*, vol. 9, n. 2, 151-173.
- Rolland-May Ch. (1984) *Les Espaces Géographiques flous*. Thèse d'Etat en Sciences Humaines, Université de Metz.
- Rolland-May Ch. (1987) La théorie des ensembles flous et son intérêt en géographie. *L'espace géographique*, tome 16, n°1, 42-50.
- Roncayolo M. (1996) *Les grammaires d'une ville. Essai sur la genèse des structures urbaines à Marseille*. Editions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris.
- Roncayolo M. (2002) *Lectures de villes : formes et temps*. Parenthèses, Marseille.
- Rougé L. (2007) Inégale mobilité et urbanité par défaut des périurbains modestes toulousains. *EspacesTemps.net*, 25.04.2007.
- Russell S., Norvig P. (1994) *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Salingaros N. (2005) *Principles of Urban Structure*. Delft University of Technology, Techne Press, Delft.
- Salingaros N. (2006) *A Theory of Architecture*. Umbau-Verlag, Solingen.
- Salingaros N. (2010) *Twelve Lectures on Architecture: Algorithmic Sustainable Design*. Isi Books, Wilmington, DE.
- Sanders L. (1992) *Système de villes et synergétique*. Anthropos, Paris.
- Sanders L., Pumain D., Mathian H., Guérin-Pace F., Bura S. (1997) SIMPOP: a multiagent system for the study of urbanism, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 287-305.
- Scarella F. (2014) *La ségrégation résidentielle dans l'espace-temps métropolitain : analyse spatiale et géoprospective des dynamiques résidentielles de la métropole azurienne*. Thèse de doctorat en géographie, Université Nice Sophia Antipolis, Septembre 2014.
- Schelling, T. (1971). Dynamic models of segregation. *Journal of Mathematical Sociology*, 1, 143-186.
- Scherrer F., Vanier M. (dir.) (2013) *Villes, Territoires, Réversibilités*. Collection Colloques de Cerisy, Hermann Editeur, Paris.
- Schmidhuber J. (2015) Deep Learning in Neural Networks: An Overview. *Neural Networks*. 61, 85–117. arXiv:1404.7828
- Schrödinger E. (1944) *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Schumpeter J. (1942) (2014) *Capitalism, socialism and democracy*. Impact Books, Floyd, VA.

- Schwanen T., Dielman F., Dijst M. (2004) The Impact of Metropolitan Structure on Commute Behavior in the Netherlands: A Multilevel Approach. *Growth and Change*, 35(3), 304-333.
- Scientific American (ed.) (2014) *Designing the Urban Future: Smart Cities*. Scientific American, New York.
- Searle J. (1995) *The Construction of Social Reality*. Free Press, New York.
- Seewer U. (2004) La mobilité de loisir : situation actuelle, tendance et stratégies. In L. Vodoz et al. (Eds.) *Les territoires de la mobilité. L'aire du temps*, PPUR, Lausanne, p. 183-192.
- Sevtsuk A. (2010) *Path and place: a study of urban geometry and retail activity in Cambridge and Somerville, MA*. PhD Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Sevtsuk A., Mekonnen M. (2012) Urban Network Analysis Toolbox. *International Journal of Geomatics and Spatial Analysis*, 22 (2), 287-305.
- Shackle G. (1949) *Expectations in Economics*. Gibson Press, London.
- Shafer G. (1976) *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Shafer G. (1981) Jeffrey's rule of conditioning. *Philosophy of Science*, 48(1981), 337-362.
- Shannon, C. E. (1948) A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379-423 & 623-656.
- Sieverts Th. (1997) *Zwischenstadt. Zwischen Ort und Welt, Raum und Zeit, Stadt und Land*. Vieweg, Braunschweig.
- Simon H. (1962) The Architecture of Complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 106(6), 467-482.
- Sitte C. (1996 [orig. 1889]) *L'art de bâtir les villes*. Seuil, Paris.
- Skifter Andersen H. (2011) Explaining preferences for home surroundings and locations. *Urbani izziv*, volume 22, no. 1/2011, 100-114.
- Slater T.R. (ed.) (1990) *The Built Form of Western Cities*. Leicester University Press, Leicester.
- Smets P., Kennes R. (1994) The transferable belief model. *Artificial Intelligence*, 66, 191-234.
- Smith B. (1996) Mereotopology: A Theory of Parts and Boundaries. *Data and Knowledge Engineering*, 20 (1996), 287-304.
- Spectorsky A. (1955) *The Exurbanites*. Lippincott, Philadelphia.
- Srirangam S., Forsyth W. (2012) Culture and Commerce of Chennai City – A Spatial Analysis of the Relationship between Temples and Retail Activity. In Proceedings of the Eighth International Space Syntax Symposium, Santiago de Chile, <http://www.sss8.cl/media/upload/paginas/seccion/8120.pdf>.
- Stanilov K., Case Scheer B. (eds.) (2004) *Suburban form*. Routledge, London.
- Steadman P. (1983) *Architectural Morphology: An Introduction to the Geometry of Building Plans*. Pion, London.
- Stirling A. (2010) Keep it complex. *Nature*, 468(7327), 1029-1031.
- Stock M. (2004) L'habiter comme pratique des lieux géographiques. *EspaceTemps.net*, Travaux, 18.12. 2004, <http://www.espacetemps.net/articles/habiter-comme-pratique-des-lieux-geographiques>
- Stouffer, S. (1940) Intervening Opportunities: A Theory Relating to Mobility and Distance. *American Sociological Review. American Sociological Association*. 5 (6): 845-867.
- Studer R., Benjamins V.R., Fensel D. (1998) Knowledge Engineering: Principles and Methods. *Data & Knowledge Engineering*, 25, 161-197.
- Taillandier P., Vo D-A., Amouroux E., Drogoul A. (2012) GAMA: a simulation platform that integrates geographical information data, agent-based modeling and multi-scale control. *Proceedings of the PRIMA'12 Conference*.

- Taillandier P., Bourgeois M., Caillou P., Adam C., Gaudou B. (2016) A BDI agent architecture for the GAMA modeling and simulation platform, *MABS 2016 Multi-Agent-Based Simulation, May 2016, Singapore*, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01391002/document>
- Taleb N. N. (2007) *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*. Random House, New York.
- Taleb N. N. (2012) *Antifragile. Things that gain from disorder*. Random House, New York.
- Talen E. (2012) *City Rules: How Urban Regulations Affect Urban Form*. Island Press, Washington.
- Taylor N. (1998) *Urban Planning Theory since 1945*. Sage Publications, London.
- Teaford J. (2008) *The American Suburb: The Basics*. Routledge, London.
- Teller J., Keita A.K., Roussey C., Laurini R. (2007) Urban Ontologies for an improved communication in urban civil engineering projects. *Cybergeog*, n. 386, <http://cybergeog.revues.org/8322>
- Thibaud J.-P. (2002) L'horizon des ambiances urbaines, *Communications*, 73, 185-201.
- Thisse J.-F. (2002) *Théorie des jeux. Une introduction*. Miméo, Université Catholique de Louvain.
- Thom R. (1972) *Stabilité structurelle et morphogénèse*. InterÉditions, Paris.
- Thom R. (1983) *Paraboles et catastrophes*. Flammarion, Paris.
- Thomas I., Frankhauser P., De Keersmaecker M.-L. (2007) Fractal dimension versus density of built-up surfaces in the periphery of Brussels. *Papers in Regional Science*, 86, 287–308.
- Tobler W. (1970) A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46(2), 234-240.
- Torrens P. (2002) Cellular Automata and Multi-Agent Systems as Planning Support Tools. In S. Geertman & J. Stillwell (Eds.) *Planning Support Systems in Practice*. Springer, pp. 205-222.
- Toubin M., Lhomme S., Diab Y., Serre D., Laganier R. (2012) La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ? *Développement durable et territoires*, vol. 3, n°1, 1-17.
- Tran D.B., Piombini A., Ignatowicz M., Moreno D., Frigui R., Aguiléra A., Badariotti D. (2014) Morphologie urbaine et mobilité dans la Communauté Urbaine de Strasbourg. *Cybergeog*, n°702, <https://cybergeog.revues.org/26665>
- Turco A. (1988) *Verso una teoria geografica della complessità*. Unicopli, Milano.
- Turing A.M. (1952) The Chemical Basis of Morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, vol. 237, n° 641, 37-72.
- Turner A. (2000) *Angular analysis: a method for the quantification of space*. Working Paper 23. Centre for Advanced Spatial Analysis, UCL, London.
- Turner A. (2007) From Axial to Road-Centre Lines: A New Representation for Space Syntax. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34 (3), 539-555.
- Turner, A. (2001) Angular analysis. In: J. Peponis, J. Wineman, S. Bafna (eds.) *Proceedings of the Space Syntax Third International Symposium*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, p. 30.01-30.13.
- Unwin R. (1909) *Town Planning in Practice, an Introduction to the Art of designing Cities and Suburbs*. T. F. Unwin, London.
- Urry J. (2000) *Sociology Beyond Societies: Mobilities for the Twenty-First Century*. Routledge, London.
- Urry J. (2007) *Mobilities*. Polity, Cambridge.
- Vance J. (1990) *The Continuing City. Urban Morphology in Western Civilization*. Johns Hopkins University Press, Baltimore.

- Van de Coevering P., Schwanen, T. (2006) Re-evaluating the impact of urban form on travel patterns in Europe and North-America. *Transport Policy*, 13(2006), 229-239.
- Van der Laan L., Vogelzang J., Schalkel R. (1998) Commuting in multinodal urban systems; an empirical comparison of three alternative models. *ERSA 1998*, Vienna, <http://www-sre.wu.ac.at/ersa/ersaconfs/ersa98/papers/252.pdf>
- Vanier M. (2000) Qu'est-ce que le tiers espace ? Territorialités complexes et construction politique. *Revue de géographie alpine*, 88(1), 105-113.
- Van Nes (2005) Typology of shopping areas in Amsterdam. *Proceedings of the 5th Space Syntax International Symposium*, <http://spacesyntax.tudelft.nl/media/Long%20papers%20I/akkelies.pdf>
- Varenne F. (2015) La sous-détermination des modèles explicatifs par les lois empiriques : un problème récurrent mais fécond en géographie de modélisation. In C. Blanckaert et al. (eds.) *Modèles et modélisations, en sciences du langage, de l'homme et de la société. Perspectives historiques et épistémologiques*. L'Harmattan, Paris.
- Vattimo G., Rovatti P.A. (eds.) (1983) *Il pensiero debole*. Feltrinelli, Milano.
- Veltz P. (1996) *Mondialisation, villes et territoires. L'économie d'archipel*. PUF, Paris.
- Venerandi A., Zanella M., Romice O., Dibble J., Porta S. (2017) Form and urban change – An urban morphometric study of five gentrified neighbourhoods in London. *Environnement and Planning B: Planning and Design*, 44(6), 1056–1076
- Vernez-Moudon A. (1997) Urban morphology as an emerging interdisciplinary field. *Urban Morphology*, 1(1997), 3-10.
- Voiron-Canicio Ch. (2012) L'anticipation du changement en prospective et des changements spatiaux en géoprospective. *L'espace géographique*, 2012/2 (Tome 41), 99-110.
- Voiron-Canicio Ch. (2015) Une ville « résiliente » ? Quid de l'innovation dans la marche vers la durabilité urbaine. In I. Hajek et Ph. Hamman (eds.) *La gouvernance de la ville durable entre déclin et réinventions - Une comparaison Nord/Sud*. Presses Universitaires de Rennes, Rennes, p. 267-277.
- Voiron-Canicio Ch., Dutozia J. (2017) Anticiper et simuler les dynamiques de changement pour diagnostiquer et améliorer la résilience d'un système territorial urbain. *Risques Urbains*, 1, 1-17.
- Von Bertalanffy L. (1968) *General System Theory*. George Braziller, New York.
- Voorhees A. (1956) A General Theory of Traffic Movement. *1955 Proceedings of the Institute of Traffic Engineers*, New Haven, Connecticut.
- Walker W., Lempert R., Kwakkel J. (2013) Deep Uncertainty. In S. Glass and M. Fu (Eds.) *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Springer, Berlin.
- Walley P. (1991) *Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities*. Chapman and Hall, London.
- Wang F., Chen C., Xiu C., Zhang P. (2014) Locational analysis of retail stores in Changhun, China: A street centrality perspective. *Cities*, 41(2014), 54-63.
- Wang Y., Liu W., Bell D. (2007) Combining Uncertain Outputs from Multiple Ontology Matches. In H. Prade, V.S. Subrahmanian (eds.) *SUM 2007, LNAI*, 4772, Springer, p. 201-214.
- Ward M.O. (2002) A taxonomy of glyph placement strategies for multidimensional data Visualization. *Information Visualization*, 194-210.
- Wasserman S., Faust K. (1994) *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge University Press, New York.
- Watts D., Strogatz S. (1998) Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*. 393 (6684), 440–442.
- Weaver W. (1948) Science and Complexity. *American Scientist*, 36, 536-544.

- Weber M. (1922) *Wirtschaft und Gesellschaft*. J.C.B. Mohr, Tübingen.
- Wegener M. (2004) Overview of Land-Use Transport Models. In D.A. Hensher, K. Button (eds.) *Transport Geography and Spatial Systems*. Elsevier, Amsterdam, p. 127–146.
- Wehrens R., Buydens L. M. C. (2007) Self- and Super-organizing Maps in R: The kohonen Package. *Journal of Statistical Software*, 21(5), <https://www.jstatsoft.org/article/view/v021i05/v21i05.pdf>
- Weidlich W., Haag G. (eds.) (1988) *International Migration. Dynamic Theory and Comparative Analysis*. Springer, Berlin.
- West B.J., Salk J. (1987) Complexity, Organization and Uncertainty. *European Journal of Operations Research*, 30, 117-128.
- Wiel M. (1999) *La transition urbaine ou le passage de la ville pédestre à la ville motorisée*. Mardaga, Liège.
- Wiener N. (1948) *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press, Cambridge.
- Williamson J. (2005) *Bayesian Nets and Causality: Philosophical and Computational Foundations*. Oxford University Press, Oxford.
- Wilson A. (1974) *Urban and regional models in geography and planning*. John Wiley, Chichester.
- Wilson A. (1981) *Catastrophe theory and bifurcation: applications to urban and regional systems*. Croom Helm, London.
- Wilson A. (2000) *Complex Spatial Systems. The Modelling Foundations of Urban and Regional Analysis*. Prentice Hall, Harlow.
- Wilson, A. (1970) *Entropy in urban and regional modelling*. Pion, London.
- Withers S. (2002) Quantitative methods: Bayesian inference, Bayesian thinking. *Progress in Human Geography*, 26(4), 553-566.
- Wolfram S. (2002) *A new Kind of Science*. Wolfram Research, Champaign, IL.
- Yamada I., Thill J.-C. (2007) Local indicators of network-constrained clusters in spatial point patterns. *Geographical Analysis*, 39(3), 268–292.
- Yamada I., Thill J.-C. (2010) Local indicators of network-constrained clusters in spatial patterns represented by a link attribute. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(2), 269-285.
- Ye Y., Van Nes A. (2014) Quantitative tools in urban morphology: combining space syntax, spacematrix and mixed-use index in a GIS framework. *Urban Morphology*, 18(2), 97-118.
- Yule G. (1925) A mathematical theory of evolution based on the conclusions of Dr. J. C. Willis. *Philos. Trans. R. Soc. London*, B 213, 21–87.
- Zadeh L. (1965) Fuzzy sets. *Information and Control*, 8 (3), 338–353.
- Zadeh L. (1978) Fuzzy Sets as the Basis for a Theory of Possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1, 3–28.
- Zadeh L. (1996) *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers by Lotfi A. Zadeh*. Edited by B. Yuan et G. Klir. World Scientific Publishing Co., River Edge, NJ.
- Zhang J., Goodchild M. (2002) *Uncertainty in Geographical Information*. Taylor & Francis, London.
- Zhang X., Zhu Q., Wang J. (2004) 3D City Models Based Spatial Analysis to Urban Design. *Annals of GIS*, 10(1), 82-86.
- Zipf G. (1946) The Hypothesis on the Intercity Movement of Persons. *American Sociological Review*, 11(6), 677–686.
- Zipf G. (1949) *Human Behavior and the Principle of Least Effort*. Addison-Wesley, Reading, MA.